



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**FACTORES ASOCIADOS A LA
OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES
EN EL ESTADO DE HIDALGO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:
MIGUEL ÁNGEL CRUZ ESPÍNDOLA

Chapingo, Texcoco, Edo. de México, enero 2016



FACTORES ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL
ESTADO DE HIDALGO

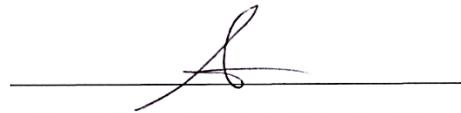
Esta tesis fue realizada por el Biól. Miguel Ángel Cruz Espíndola, bajo la dirección del Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo y asesorado por el Dr. Antonio Villanueva Morales y el M.C. Javier Santillán Pérez. Fue revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y Jurado Examinador, para obtener el título de Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales.

PRESIDENTE



DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO

SECRETARIO



DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

VOCAL



M.C. JAVIER SANTILLÁN PÉREZ

Chapingo, Texcoco, Edo. de México, enero 2016.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, a los profesores que me impartieron clases, por compartirme su conocimiento y experiencia, y al personal administrativo de la Coordinación, por su apoyo y disposición.

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, por guiarme en la realización de este trabajo, por su disponibilidad y apoyo.

Al comité de tesis, por el tiempo otorgado para la revisión de este escrito.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nació en el municipio de Pilcaya, Gro. el 30 de mayo de 1984. Es biólogo por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

De 2009-2010 trabajó en diversos proyectos en el Laboratorio de Geomática del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP). En 2012 se incorporó al Instituto de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, en el proyecto: “Aplicación de un índice meteorológico de predicción de incendios forestales en Áreas Naturales Protegidas del Centro de México”, desempeñándose en el manejo de bases de datos climáticos con escasa información.

En agosto de 2013 ingresó al Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

Su área de trabajo es la investigación de los incendios forestales con fines de prevención y manejo del fuego. En la parte aplicada le interesa el manejo de los sistemas socioambientales para la conservación de los ecosistemas. Además, la restauración ecológica de zonas perturbadas.

DEDICATORIA

A mi Mamá, por ser el origen de lo que soy.

A mi Papá, Leti, hermanas y hermanos, porque son parte de mi vida.

*A Noheli, Fatima, Fernandito, Santiago, Julia y al pequeño Andi que está en camino;
mis sobrinos.*

A mi hermana, sobrina y cuñado, por brindarme su hogar.

A mi abuelita "Elia", con todo mi amor.

A Amairani, por su amor y compañía.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
2.1 Descripción del área de estudio.....	6
2.2 Creación de la base de datos.....	11
2.3 Modelo estadístico.....	16
2.4 Construcción del modelo estadístico.....	19
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	20
3.1 Modelo logístico.....	20
3.2 Explicación del comportamiento de las variables.....	23
3.3 Índice de peligro de incendios.....	27
4. CONCLUSIONES.....	35
5. BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros		Pág.
1	Tipos de vegetación del estado de Hidalgo.	9
2	Tres grandes regiones de Hidalgo y su fauna característica.	10
3	Variables empleadas para explicar la incidencia de incendios forestales en los municipios del estado de Hidalgo.	12
4	Cartas de uso de suelo y vegetación utilizadas para obtener información de superficies.	15
5	Categorías formadas de las variables de estudio.	18
6	Variables incluidas en el modelo y coeficientes de la regresión e intervalos de confianza.	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras		Pág.
1	Localización del área de estudio, municipios de Hidalgo, México.	7
2	Categorías de peligro utilizadas.	19
3	Probabilidad estimada de peligro de incendios forestales para los municipios de Hidalgo.	27
4	Grado de peligro de incendios forestales para los municipios de Hidalgo.	28
5	Probabilidad de ocurrencia de incendios. a) <i>pib_p_c</i> bajo y b) <i>pib_p_c</i> alto.	30
6	Comparación visual de la clasificación de las cuatro variables consideradas en el modelo estadístico.	32

FACTORES ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE HIDALGO

FACTORS ASSOCIATED TO THE OCCURRENCE OF FOREST FIRES IN THE STATE OF HIDALGO

RESUMEN

Se identificaron los factores meteorológicos, productivos, de uso del suelo y sociales, que mejor explicaron la ocurrencia de conflagraciones en 84 municipios del estado, durante el periodo 2000-2011. Con base en el análisis de seis variables de siniestralidad y 79 explicatorias. Mediante regresión logística se construyó un modelo de probabilidad donde las variables significativas fueron: superficie de bosque, Producto Interno Bruto *per cápita*, longitud de carreteras y área perturbada, ésta última con correlación negativa. A partir de la probabilidad de ocurrencia de incendio forestal se estableció una escala de peligro y se plasmó en un mapa. Fueron 39 municipios los que se ubicaron en una categoría media y 10 en la alta, estas áreas son de interés en las estrategias de manejo del fuego. Las variables en el modelo estuvieron estrechamente ligadas a las actividades humanas, lo cual evidenció la importancia de considerar el factor humano en la evaluación de riesgo de incendios. El desarrollo de políticas eficientes de incendios forestales requiere una comprensión subyacente de las razones detrás de las igniciones con miras hacia el manejo integral del fuego.

PALABRAS CLAVE: Factores de riesgo, incendios forestales, Índice de Peligro de Incendio, manejo integral del fuego, regresión logística, uso del suelo.

ABSTRACT

This work was identifies in order of detecting meteorological, productive, use of soil and economic variables that better explained the forest fires risk in 84 municipalities of the state, during the period 2000-2011. Considering the analysis of six forest fires-related variables and 79 independent variables. By means of logistic regression there was build a predictive model, four explanatory variables were identified: forest surface, Gross Internal Product per capita, length of highways and mentally disturbed area with negative correlation. The probabilistic output of the logistic was use for a danger scale of fire risk and it took shape of a map: there were 39 municipalities located in a low category and 10 in the high one, these areas are of interest in the strategies of handling of the fire. The variables in the model were relate to the human activities that demonstrated the importance of the human factor in the evaluation of risk of fires. The development of efficient politics of forest fires needs an underlying comprehension of the reasons behind the ignitions with sights towards the integrated fire management.

KEY WORDS: Fire risk, Fire Danger Index, forest fires, integrated fires management, land use, logistic regression.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales en el mundo son afectados por varios factores, pero entre ellos, existe uno que provoca una serie de cambios en varios aspectos (ecológicos, social, político, económico) y en diferentes lapsos. Este factor es el fuego. Los incendios forestales son un fenómeno importante, ya que en poco tiempo pueden afectar grandes extensiones de bosque y causar pérdidas económicas, de biodiversidad y en ocasiones de vidas humanas (Flores y Benavides, 1994).

Chuvieco y Congalton (1989) mencionan que el estudio de los incendios forestales requiere, en la mayoría de los casos, un análisis integrado del territorio, pues un incendio forestal no se genera por la acción de un factor aislado, sino que se deriva de la acción conjunta de un grupo de factores, entre los cuales la vegetación, los tipos climáticos, topografía y actividades humanas resultan especialmente significativas. En muchos sistemas ecológicos, los incendios forestales tienen un gran impacto negativo por la degradación que sufren el suelo y la cobertura vegetal, y por las emisiones de gases de efecto invernadero; pero los efectos causados no siempre son negativos. El fuego es un agente que influye en la heterogeneidad estructural de los bosques, la cual es esencial para el mantenimiento de la biodiversidad (Fulé *et al.* 2002; Cochrane, 2003). Los incendios forestales han sido parte de la dinámica de los ecosistemas terrestres del mundo y una importante fuerza selectiva en los procesos de evolución de la biota (Whelan, 1995).

En diferentes regiones del mundo se registran altos porcentajes de incendios de origen antrópico, lo cual pone en evidencia la importancia de la presión humana en la frecuencia del disturbio (Kitzberger, 2003). Es frecuente observar que las áreas de más alta posibilidad de un incendio se encuentran próximas a caminos, carreteras o poblados, así como en áreas de fuertes pendientes, zonas de pastoreo, lugares de recreo o áreas de aprovechamiento maderable (Martínez *et al.* 1990).

En México, cada año se registran numerosos incendios forestales, los cuales afectan en diversos grados a los diferentes ecosistemas terrestres. Se refiere que en promedio, 98% son causados por actividades humanas y 2% por causas naturales (CONAFOR, 2012). A reserva de imprecisiones que puede haber en dicha estimación, lo anterior pone de manifiesto la estrecha relación entre incendios y actividades humanas en el país. Existen diversos estudios que han identificado algunas variables relacionadas con la causalidad e incidencia de incendios forestales, por ejemplo: Román y Martínez (2006) determinaron que a mayor densidad de caminos y de extensiones agrarias aumenta la incidencia de incendios forestales en Reservas de la Biósfera del estado de Chiapas; Rodríguez *et al.* (2008) encontraron que la superficie de área perturbada, la velocidad más alta de las máximas de viento, el número de productores agrícolas apoyados durante el ciclo productivo primavera verano, el número de combatientes de incendios forestales y el nivel de alfabetización fueron las variables más relacionadas con la superficie afectada, el número de incendios y otros indicadores de siniestralidad en México; Ávila *et al.* (2010) identificaron la relación cercana entre la intensidad y uso del suelo, y el cambio del uso del suelo, con los patrones de ocurrencia de fuego en

Durango; Carrillo *et al.* (2012) demostraron que la precipitación media anual, exposición del terreno y el número de ramales de vías de comunicación estuvieron relacionados con la distribución espacial de los siniestros en Puebla; Pérez *et al.* (2013) hallaron la influencia de la densidad de población y vías de acceso con el tamaño de los incendios en Durango.

De acuerdo con los antecedentes, en el estado de Hidalgo no se ha realizado este tipo de estudios. Lo mismo puede decirse para la mayor parte de las entidades federativas de la República Mexicana. En el Programa Forestal Estatal 2011-2016, el Gobierno del Estado reconoce la importancia de este tema, pues se tienen una tasa anual creciente de pérdida y degradación de los bosques (10,000 ha/año), principalmente debido a la conversión del suelo forestal a tierras agrícolas y de pastoreo, tala clandestina, incendios forestales, plagas y enfermedades forestales. En la misma publicación se menciona que para reducir la superficie afectada por cada conflagración, se requiere la aplicación de todas las acciones de protección contra incendios que implica la instrumentación de la prevención, detección, combate, control y extinción para contener el daño potencial de los incendios y conservar los recursos forestales (SEMARNATH, 2011). El desarrollo de políticas eficientes de incendios forestales requiere una comprensión subyacente de las razones detrás de las igniciones (Chas *et al.* 2012).

El incremento en el número de incendios forestales durante los últimos años sigue provocando en la sociedad actual una opinión generalizada: el único camino para controlar este fenómeno, reducir los daños y la alarma social que provocan es la prevención. Sin embargo, existen otras opciones que ya se están comenzando a

explorar en México, como el manejo integral del fuego que integra el uso comunitario del fuego con el uso ecológico-silvícola del mismo y con la prevención y combate de incendios forestales. El objetivo de este esquema de manejo es la reducción de los incendios no deseados, a la par con una utilización juiciosa del fuego por parte de las comunidades rurales, empatada con el uso técnico del fuego, fundamentado científicamente a través de quemas prescritas (Rodríguez, 2000, 2015).

De acuerdo con el enfoque del presente estudio, la primera tarea para avanzar será determinar cuáles son las causas que provocan los incendios forestales. **El objetivo de este trabajo fue identificar los factores que mejor explican la ocurrencia de incendios forestales en los diferentes municipios del estado de Hidalgo durante el periodo 2000-2011.** Se partió de la hipótesis de que los siniestros originados por las actividades humanas de forma reiterada en un determinado ámbito geográfico, no pueden explicarse sólo por las condiciones físicas o naturales del medio; pero tampoco pueden reducirse a factores de comportamiento humano individual. Sino que pueden ser resultado de una pauta social cuyo origen debe buscarse en las condiciones ambientales, forestales y socioeconómicas de cada zona.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

El estado de Hidalgo se ubica en la región centro-oriental de México. Sus coordenadas son: al norte 21° 24', al sur 19° 36' de latitud norte; al este 97° 58', al oeste 99° 53' de longitud oeste. Colinda al norte con Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz; al este con Veracruz y Puebla; al sur con Puebla, Tlaxcala y Estado de México, y al oeste con Estado de México y Querétaro. Tiene una superficie de 20 846.5 km², lo que representa el 1.1% de la superficie del país. Cuenta con 84 municipios (INEGI, 2012a) (Figura 1).

La superficie estatal forma parte de las provincias Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico. Se tienen dos zonas en la entidad: la norte y nororiental, en donde se encuentra cerro Ojo de Agua con 2180 msnm y cerro Tepecoa con 1840 msnm; existen valles en los que se encuentra la altura más baja (100 m). En la parte central, de noroeste-sureste se encuentra el cañón Metztitlán. Al centro y occidente se localiza Mineral del Monte, sierras de origen sedimentario e ígneo extrusivo o volcánico. Hay amplias llanuras en donde se encuentran asentadas las localidades de Mixquiahuala de Juárez, Actopan y Santa Ana Hueytlalpan, en toda la zona también se distribuyen lomeríos. En las cercanías de la localidad de Acaxochitlán se encuentra el cerro la Peñuela, la mayor elevación del estado, con 3350 msnm (INEGI, 2012a).



Figura 1. Localización del área de estudio, municipios de Hidalgo, México.

El estado se encuentra comprendido casi en su totalidad dentro de la región hidrológica río Pánuco y sólo una pequeña extensión de la porción oriental forma parte de la región Tuxpan-Nautla (INEGI, 2012a).

En la entidad se distinguen tres zonas climáticas: zona de climas cálidos y semicálidos de la Huasteca, zona de climas templados de la Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico, y zona de climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental y Eje Neovolcánico. Las lluvias se presentan en verano, en los meses de junio a septiembre. La precipitación media es de 800 mm anuales. La temperatura media anual es de 16°C. La temperatura mínima del mes más frío, enero, es alrededor de 4°C y la máxima se presenta en abril y mayo, que en promedio es de 27°C (INEGI, 2012a).

Existe una amplia variedad de vegetación por los diferentes climas y altitudes que se presentan en la entidad: predominan los bosques húmedos de montaña distribuidos en una franja desde el norte, noreste y continúa hacia el este; los bosques de coníferas se ubican a lo largo de la Sierra Madre Oriental, del noreste y centro hasta el sureste; los bosques de encino y sus asociaciones con pinos se concentran principalmente en el centro y noroeste, pero también se esparcen hacia el oeste y suroeste. Los matorrales están mejor representados en el oeste y suroeste, y en menor intensidad en el noroeste y centro. Las selvas perennifolias se sitúan principalmente al norte, noreste y este. También existen pastizales cuya distribución se concentra en el centro y de manera más dispersa en el occidente y en el sur. De la superficie estatal, 47% se dedica a la actividad agrícola (INEGI,

2015a; SEMARNAT, 2015). En el Cuadro 1 se mencionan los principales tipos de vegetación.

Cuadro 1. Tipos de vegetación del estado de Hidalgo.

Tipos de vegetación	Principales especies
Bosque de pino	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl. <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. greggii</i> , <i>P. cembroides</i>
Bosque de encino	<i>Quercus mexicana</i> , <i>Q. castanea</i> , <i>Q. affinis</i> , <i>Q. eduardii</i> , <i>Q. obtusata</i> , <i>Q. sartorii</i> , <i>Q. laeta</i> , <i>Q. deserticola</i> .
Asociación de encinos y pinos	<i>Pinus teocote</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. cembroides</i> , <i>Quercus mexicana</i> , <i>Q. rugosa</i> , <i>Q. crassipes</i> , <i>Q. crassifolia</i> .
Bosque de oyamel	<i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus firmifolia</i> , <i>Cupressus lindleyi</i> , <i>Prunus serotina</i> , <i>Quercus rugosa</i> , <i>Q. crassifolia</i> , <i>Q. laurina</i> , <i>Arbutus glandulosa</i> , <i>A. xalapensis</i> .
Bosque de táscate	<i>Juniperus flacciday</i> , <i>J. monticola</i> <i>J. deppeana</i> , <i>Cupressus</i> sp., <i>Quercus frutex</i>
Bosque mesófilo de montaña	<i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Clethra pringlei</i> , <i>Alnus jorullensis</i> , <i>Carpinus caroliniana</i> , <i>Cornus excelsa</i> .
Chaparral	<i>Quercus</i> sp., <i>Actostaphylos</i> sp., <i>Adenostoma</i> sp., <i>Cercocarpus</i> sp., <i>Opuntia</i> sp.
Matorral crasicaule	<i>Opuntia streptacantha</i> , <i>Myrtillocactus geometrizans</i> , <i>Cephalocereus senilis</i> , <i>Pachycereus marginatus</i> , <i>Stenocercus dumortieri</i> , <i>Yuca filitifera</i> , <i>Karwinskia humboldtiana</i> , <i>Celtis monoica</i> , <i>Senna racemosa</i> , <i>Pseudosmodingium andrieuxii</i> , <i>Acacia berlandieri</i> .
Matorral rosetófilo	<i>Agave radiata</i> , <i>A. salmiana</i> , <i>A. xylonacantha</i> , <i>Dasyilirion acrotriche</i> , <i>Beschorneria rigida</i> .
Matorral submontano	<i>Karwinskia mollis</i> , <i>Fouquieria fasciculata</i> , <i>Neopringlea integrifolia</i> , <i>Senna racemosa</i> , <i>Lantana camara</i> , <i>Ipomoea pedatisecta</i> , <i>I. purpurea</i> , <i>I. tyrianthina</i> .
Pastizal inducido	<i>Bouteloua aristiroides</i> , <i>Aristida glauca</i> y <i>Muhlenbergia microsperma</i> .

Selva baja caducifolia	<i>Cedrela mexicana, Bursera morelensis, Bursera, simaruba, Capparis incata, Psidium satorium, Lysiloma sp., Prosopis laevigata</i>
Selva mediana subperennifolia	<i>Enterolobium cyclocarpum, Cedrela odorata, Andira enemis, Bucida buceras, Brosimum alicastrum, Callophylum brasiliense, Dialum guianensis, Pithecellobium leucospermum.</i>
Selva alta perennifolia	<i>Brosimum alicastrum, Dendropanax arboreus, Heliocarpus donell-smithii, Bursera simaruba.</i>

Fuente: CONANP, 2003; SERFORH, 2010; SEMARNAT, 2015.

El Cuadro 2 muestra la fauna característica de las diferentes regiones y por tipo de vegetación. Entre las especies de mamíferos en peligro de extinción están el puma (*Puma concolor*) y el tigrillo (*Felis wiedii*).

Cuadro 2. Tres grandes regiones de Hidalgo y su fauna característica.

Regiones de Hidalgo	Tipo de vegetación	Fauna característica
Sierra	Bosque de Coníferas	Venado cola blanca (<i>Odocoileus virginianus spp. couesi</i>), gato montés (<i>Lynx rufus</i>), coyote (<i>Canis latras</i>), zorro (<i>Urocyon cinereoargenteus</i>) zorrillo (<i>Mephitis macroura</i>), conejo (<i>Sylvilagus cunicularis</i>), armadillo (<i>Dasypus novemcinctus</i>) lagartija (<i>Lepydophyma gaigeae</i>)
	Encino y pino	Cuervo (<i>Corvus brachyrhynchos</i>), murciélago (<i>Choeronycteris mexicana</i>), musaraña (<i>Cryptotis mexicana</i>), rana (<i>Rana pustulosa</i>), sapo (<i>Bufo valliceps</i>), garza (<i>Bubulcus ibis</i>), cardenal (<i>Cardinalis cardinalis</i>), tordo (<i>Turdus grayi</i>), búho (<i>Bubo virginianus</i>), zopilote (<i>Cathartes aura</i>)
la Huasteca	Selvas	Tlacuache (<i>Didelphis virginiana</i>), puerco espín (<i>Sphiggurus mexicanus</i>), tigrillo (<i>Felis wiedii</i>), tejón (<i>Nasua sp.</i>), tuza (<i>Cratogeomys merriami</i>), rata canguro (<i>Dipodomys phillipsii</i>), ardilla (<i>Sciurus oculatus</i>), lagartija (<i>Sceloporus turquatus</i>), culebra negra (<i>Thamnophis eques</i>), gavilán (<i>Accipiter cooperi</i>) codorniz (<i>Dendrortyx macroura</i>), colibrí (<i>Cynanthus latirostris</i>), cotorra (<i>Rhynchopsitta terris</i>)

		y guajolote silvestre (<i>Meleagris gallopavo intermedia Sennett</i>).
bosque mesófilo de montaña		Mosquero (<i>Campostoma imberbe</i>), zorzal (<i>Catharus mexicanus</i>), mirlo (<i>Turdus grayi</i>), colibrí (<i>Amazillia beryllina</i>), perico (<i>Forpus cyanopygius</i>), comadreja (<i>Mustela frenata</i>), armadillo (<i>Dasyopus novemcinctus</i>).
Valle del Mezquital	matorrales	Liebre torda (<i>Lepus callotis</i>) y cola negra (<i>Lepus californicus</i>), ratones de campo (<i>Peromyscus maniculatus</i>), camaleón (<i>Sceloporus jarrovi immucronatus</i>), tecolote (<i>Bufo virginianus</i>) y víbora de cascabel (<i>Crotalus atrox</i>).

Fuente: Randell, 2008; INE, 2015; SEMARNAT, 2015.

2.2 Creación de la base de datos

El primer paso consistió en identificar, a partir de revisiones bibliográficas y consultas a expertos de Hidalgo, los factores relacionados con la ocurrencia de incendios forestales en el estado; esto permitió elaborar una lista de factores de riesgo y de peligro. De acuerdo con Pyne *et al.* (1996), se debe recordar que riesgo es todo factor que puede iniciar directamente el fuego, como un rayo o la fogata mal apagada de un paseante. Por su parte, el peligro compete a cualquier factor que puede facilitar que se presente la combustión y que el incendio se desarrolle, tal como altas temperaturas, baja humedad, elevada carga de combustibles forestales o vientos veloces, entre otros.

Debido a que el estado posee una gran superficie y presenta contrastes climáticos, productivos, culturales, geográficos y sociales; se escogió el municipio como unidad espacial de análisis, pues representan áreas más homogéneas en donde podría determinarse mejor los factores asociados con los incendios. La

elección del periodo de estudio se decidió con base en la disponibilidad de datos para cada municipio, por lo anterior, se determinó abarcar del año 2000 al 2011.

Se creó una base de datos, en el programa Excel, para los 84 municipios del estado en un periodo de 12 años, la cual incluyó información de 85 variables: 26 meteorológicas; 9 de uso de suelo; 17 productivas de riesgo, es decir, indicadores de actividades agropecuarias que son causa habitual de incendio; 27 sociales, las cuáles dan cuenta del grado de desarrollo de los municipios; y 6 relacionadas con incendios forestales (Cuadro 3). Debido a que los datos de número de habitantes y superficie forestal total municipal fueron muy diversos, se relativizaron algunas variables sociales y de incendios forestales.

Cuadro 3. Variables empleadas para explicar la incidencia de incendios forestales en los municipios del estado de Hidalgo.

Variables	Descripción	Unidades
<i>Meteorológicas</i>		
Temperatura	Máxima, mínima y media (promedio, máxima y mínima).	°C
	Máxima, mínima y media de la temporada de incendios, enero-junio, (promedio, máxima y mínima).	
Precipitación	Acumulada anual (promedio, máxima, mínima).	mm
	Acumulada total anual.	
	Acumulada de la temporada de incendios, enero-julio, (promedio, máxima, mínima).	
	Acumulada total de la temporada.	
<i>Cartográficas</i>		
Uso del suelo	Superficie total del municipio, bosque, selva, zonas áridas, vegetación hidrófila y halófila, áreas perturbadas, superficie arbolada (bosques más selvas), zonas áridas más hidrófila más halófila más áreas perturbadas, superficie forestal total.	ha
<i>Socioeconómicas</i>		

Productivas	Productores apoyados en los ciclos primavera verano y otoño invierno (p-v y o-i).	no.
	Superficie apoyada en los ciclos p-v y o-i, superficie sembrada, superficie cosechada, superficie agrícola.	ha
	Monto de los apoyos en los ciclos p-v y o-i, valor de la producción.	\$
	Ganado ovino, caprino y bovino.	no.
	Ganado ovino más caprino, ganado ovino más caprino más bovino.	
Variables e índices sociales	Población total, alfabetizados de las edades de 6-14, alfabetizados de 15 años o más; población con agua entubada, viviendas con drenaje, viviendas con electricidad.	no.
	Longitud de la red carretera (pavimentada y terracería).	km
	Producto Interno Bruto (PIB) <i>per cápita</i> .	\$
	Esperanza de vida	años
	Índice de educación, índice de servicios, Índice de Desarrollo Humano (IDH), IDH en servicios, IDH en nivel de vida, IDH en género.	
Relativas a la población	Alfabetización de 6-14, alfabetización de 15 años o más, agua entubada, drenaje, electricidad	no./no.
	Longitud de carretera	km/no.
Relativas a la superficie forestal total	Alfabetización de 6-14, alfabetización de 15 años o más, agua entubada, drenaje, electricidad, ganado ovino más caprino, ganado ovino más caprino más bovino.	no./ha
	Longitud de carretera	km/ha
<i>Incendios forestales</i>		
Indicadores	Número de incendios	no.
	Superficie afectada	ha
	Superficie afectada/número de incendios	ha/no.
Relativas a la superficie forestal total	Número de incendios	no./ha
	Superficie afectada	ha/ha
	(Superficie afectada/número de incendios)	(ha/no.)/ha

La información meteorológica se obtuvo de la base de datos de estaciones climáticas superficiales de México CLICOM (Climate Computing Project) administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (CICESE, 2015): 84 estaciones de Hidalgo y otras ubicadas en la frontera con los estados colindantes, a saber, 2

de San Luís Potosí, 2 de Veracruz y 1 de Puebla. El análisis de precipitación y temperatura fue realizado con el método empleado por Gómez *et al.* (2008) para obtener modelos con escasa información, el cual toma en cuenta la altitud del terreno; y también se consideraron las isoyetas e isotermas de INEGI (2015b) para el estado. Para las variables climáticas se calcularon promedios anuales y también los correspondientes sólo a la temporada de incendios (de enero a junio).

Las variables estadísticas (productivas, número de incendios y superficie siniestrada) y la red de carreteras fueron recopiladas del Anuario Estadístico y Geográfico de Hidalgo, en su edición anual hasta cubrir todo el periodo de estudio (INEGI, 2015b). Las vías de acceso serán consideradas, pues existen estudios que relacionan número de incendios y proximidad de caminos (Muñoz *et al.* 2005), densidad de caminos (Román y Martínez, 2006), y número y longitud de caminos (Rodríguez *et al.* 2011).

Para obtener superficies municipales y usos de suelo fue necesario realizar variadas operaciones y análisis espaciales con el Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.1 (ESRI, 2012). Se utilizó la carta Áreas Geoestadísticas Municipales (INEGI, 2012b) como base para obtener las superficies forestales a partir del mapa resultado del Inventario Forestal Nacional 2000 (SEMARNAT, 2001) y las Cartas de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI escala 1:250 000 (INEGI, 2015c) (Cuadro 4). Cada carta de INEGI cubre sólo una porción del estado, así que se unieron las correspondientes a una serie para obtener la superficie total del estado en un año determinado. Debido a que la información de una carta representa la superficie de vegetación para cada municipio en el año de la toma de datos, se

procedió a obtener la tasa de cambio anual entre dos cartas para un mismo tipo de vegetación. Por ejemplo: a la superficie de bosque de un municipio, reportado en una carta de la serie IV, se le restó la superficie de bosque del mismo municipio, reportado en la serie III; el resultado se dividió entre cuatro, cantidad años entre una medición y otra. El cociente es la superficie anual de bosque que posiblemente aumentó o disminuyó en un municipio.

Cuadro 4. Cartas de uso de suelo y vegetación utilizadas para obtener información de superficies.

Clave	Nombre	Estado	Serie y año de edición	Año de la toma de datos
	Inventario Forestal Nacional 2000	Nacional	II (2000) (actualizada)	1999 y 2000
E1402	Cd. de México	México	III (2003), IV (2010) y V (2013)	2003, 2007 Y 2011, respectivamente
F1411	Pachuca de Soto	Hidalgo	III (2003), IV (2010) y V (2013)	2003, 2007 Y 2011, respectivamente
F1408	Cd. Valles	SLP	V (2013)	2011

Los datos de las variables de tipo social se obtuvieron, principalmente, de la página electrónica del Departamento de Estadística, Matemática y Cómputo de la Universidad Autónoma Chapingo (DEMYC, 2015). Esta información se complementó con los informes del PNUD (2006, 2009, 2012). Dado que los índices sociales se calculan cada 5 años (2000, 2005 y 2010) se debió obtener una tasa de cambio municipal anualizada: (el valor de un índice para un municipio. en el año 2005 - el valor del mismo índice y municipio del año 2000) / 5 (número de años que hay entre 2000 y 2005). El cociente es la cantidad anual que pudo aumentar el índice en el municipio.

Cuando se trabaja con un conjunto tan grande de variables, el grado de multicolinealidad es inevitablemente muy elevado. Con el fin de reducir los posibles efectos, con el paquete estadístico SAS 9.0 (SAS, 2002), se realizaron análisis exploratorios y matrices de correlación mediante el coeficiente de Pearson entre todas las variables. Las variables explicativas dependientes entre sí fueron eliminadas. Además, debido a que 22 municipios del estado no presentaron incendios en los años de estudio, y un municipio no tuvo superficie forestal, se decidió eliminar esos registros. Después de la depuración, la base de datos para el análisis estuvo compuesta por 732 observaciones y 80 variables: seis de la manifestación del número de incendios y de la superficie que afectan, que fueron consideradas como variables respuesta, y 74 independientes referidas a características sociodemográficas y territoriales. Entonces, se realizó otro análisis para conocer la relación entre las variables independientes y la de respuesta; como era de esperarse, los valores del coeficiente fueron bajos en general y se tuvo que seleccionar los mayores valores. Después de las comparaciones, se seleccionaron 10 variables para realizar el análisis de regresión: temperatura media promedio, temperatura máxima máxima de la temporada, número de ovinos, número de caprinos, número de bovinos, superficie de bosque, áreas perturbadas, esperanza de vida, longitud de carreteras y PIB per cápita. Fueron consideradas significativas todas las variables previamente elegidas con un alfa de 0.05.

2.3 Modelo estadístico

Para el análisis estadístico de probabilidad de incendios forestales, se utilizó el modelo de regresión logística de Hosmer y Lemeshow (2000):

$$P = \frac{1}{(1 + e^{-(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n)})}$$

Donde:

P = probabilidad de ocurrencia de incendios forestales

e = base de los logaritmos naturales

α = ordenada al origen

β_i = constante asociada a la variable independiente X_i y así sucesivamente hasta $\beta_n X_n$.

El método de regresión logística requiere de una variable dependiente binomial, por lo tanto, se transformó la variable continua (número de incendios forestales) a binomial, asignando un valor de 0 si no ocurrió un incendio y 1 si hubo por lo menos una conflagración durante el año.

El análisis se realizó con el procedimiento logístico (*Proc logistic*) del programa SAS 9.0 (SAS, 2002) para microcomputadoras. Para evaluar si los parámetros eran significativos se examinaron las estimaciones de estos y los p-valores de la prueba chi-cuadrada (χ^2) del estadístico de Wald. El análisis de las 10 variables, seleccionadas previamente, se llevó a cabo por etapas (stepwise) “hacia atrás” y se fueron probando una a una hasta eliminar las que no aportaron efectos estadísticamente significativos ($p \geq 0.05$) al modelo. Finalmente, se seleccionaron cuatro variables: dos de uso del suelo, área perturbada (*apertura*) y superficie de bosque (*supbosq*), y dos sociales, longitud de carreteras (*longcarr*) y PIB *per cápita* (*pib_p_c*). Se eligieron pocas variables porque se pretendía lograr un modelo que explicara bien los datos, pero que no fuese complejo de utilizar.

En un primer análisis de las cuatro variables incorporadas, los resultados fueron erráticos y se consideró que no explicaban correctamente el fenómeno, entonces, con el propósito mejorar el ajuste del modelo se eliminaron los valores extremos mediante la categorización de las variables *supbosq*, *pib_p_c* y *apertur*, de tal manera que solo podían tomar los valores 0 ó 1 (variables dummy) para hacer referencia a valores “mínimos” (Bajos) o “máximos” (Altos) a partir de un punto de corte, el cual se determinó en 10,000 para las tres variables (Cuadro 5). La variable *longcarr* permaneció continua debido a que el rango entre el valor mínimo y máximo era de centenas y no de millares como en las otras variables de análisis.

Cuadro 5. Categorías formadas de las variables de estudio.

Variable	Tipo	Valor mínimo	Valor máximo
<i>supbosq</i>	categoría	0	1
<i>pib_p_c</i>	categoría	0	1
<i>apertur</i>	categoría	0	1
<i>longcarr</i>	continua	4.5	689.56

El modelo logístico ha sido utilizado en análisis anteriores para la estimación de la ocurrencia de incendios forestales a escalas regionales o locales, obteniéndose modelos predictivos y explicativos, al conocer las variables de mayor importancia en el fenómeno (Carvacho, 1998). Además, la regresión logística tiene una serie de supuestos (Johnson y Wichern, 2007), como los de no asumir relación lineal entre la variable dependiente y las independientes. Por otra parte, la variable dependiente no necesita seguir una distribución normal así como ser homocedástica (homogeneidad de la varianza). Ésta técnica asume que los términos de error son

independientes y no tiene en cuenta los efectos de interacción entre las variables, es decir, no debe haber multicolinealidad.

2.4 Construcción del modelo de peligro de incendios para Hidalgo

Se estableció una escala del peligro o grado de peligro (Figura 2) en función de los valores obtenidos para la probabilidad de peligro de incendios forestal (P). Estas escalas de riesgo se plasmaron en un mapa.

Probabilidad de ocurrencia	Grado de Peligro	Tonalidad asociada en el mapa de peligro
0	---	
0.0 – 0.19	Mínimo	
0.2 – 0.39	Bajo	
0.4 – 0.59	Medio	
0.6 – 0.80	Alto	

Figura 2. Categorías de peligro utilizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Modelo logístico

El mejor modelo para la predicción de P incluyó cuatro variables: superficie de bosque (*supbosq*), PIB *per cápita* (*pib_p_c*) y longitud de carreteras (*longcarr*) que tuvieron correlación positiva, y superficie de áreas perturbadas (*apertur*), que expresó una correlación negativa. El Cuadro 6 muestra los coeficientes y variables estimadas de este modelo. La explicación de los signos del estimador indica que la mayor probabilidad de incendios asociados a las actividades humanas se produce con altos valores de superficie de bosque, PIB *per cápita* y longitud de carreteras, y con valores bajos de área perturbada.

Cuadro 6. Variables incluidas en el modelo y coeficientes de la regresión e intervalos de confianza.

Variables	g.l.	Estimación del coeficiente	Error estándar	p-valor de la prueba de Wald	Intervalos de confianza
Intercepto	1	-0.6190	0.1762	0.0004	----
<i>supbosq</i>	1	1.1825	0.3219	0.0002	1.736 – 6.132
<i>pib_p_c</i>	1	0.7485	0.1906	0.0001	1.455 – 3.071
<i>longcarr</i>	1	0.00299	0.00106	0.0049	1.001 – 1.005
<i>apertur</i>	1	-1.5231	0.2680	0.0001	0.129 – 0.369

La mayoría de los signos de los coeficientes para cada variable son lógicos, de acuerdo al conocimiento previo que se tiene de las causas de incendios en México. Para el área perturbada la relación no es la esperada, cuyo coeficiente es negativo. Rodríguez *et al.* (2008) encontraron una relación positiva entre la existencia de áreas perturbadas y la superficie afectada, ya que con frecuencia dichas áreas son

producto de una excesiva presencia de incendios, entre otras alteraciones: a mayor existencia de éstas, mayor es la superficie afectada, puesto que suelen contener vegetación más inflamable.

El modelo seleccionado a través de este análisis no tomó en cuenta las variables: temperatura media promedio, temperatura máxima máxima de la temporada, número de ganado de ovinos, número de ganado de caprinos, número de ganado de bovinos, esperanza de vida. Algunas de estas variables son consideradas significativas por otros autores, como son los casos de Rodríguez *et al.* (2008) en cuanto a la esperanza de vida y Ávila *et al.* (2010) con relación al uso de suelo.

Los valores de la regresión logística mostraron una capacidad predictiva moderada del modelo, con un porcentaje global de 66.9%. La reducción en el número de variables, para incluir en el ajuste de la técnica estadística, permitió disminuir la colinealidad y obtener un modelo más parsimonioso.

El modelo tuvo una concordancia de 66.6% y clasificó correctamente el 60% de las observaciones. Por lo anterior, la probabilidad de que ocurra al menos un incendio en un municipio de Hidalgo influenciado por las actividades humanas, puede estimarse aceptablemente mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{(1 + e^{-(-0.6190 + 1.1823(\text{supbosq}) + 0.7483(\text{pib}_p_c) + 0.00299(\text{longcar}) - 1.523(\text{apertura}))})}$$

Donde:

P = probabilidad de peligro de incendios forestales

e = número de Euler (2.7182)

supbosq = superficie de bosque (ha)

pib_p_c = PIB *per cápita* (\$ persona⁻¹)

longcarr = longitud de carreteras (km)

apertur = superficie de áreas perturbadas (ha)

La relación probabilística entre las variables estudiadas y la ocurrencia de incendios pudo ser modelada y se encontró que las variables significativas en este estudio en parte confirman lo que en otras investigaciones se ha informado para otras entidades federativas, por ejemplo: Román y Martínez (2006), Carrillo *et al.* (2012) y Pérez *et al.* (2013), encontraron que la densidad de carreteras es uno de los factores antropogénicos relacionados con la incidencia, distribución y el tamaño del fuego, respectivamente, en diferentes estados de la República Mexicana. También en otras partes del mundo, en los que hicieron uso de variables meteorológicas, socioeconómicas y cartográficas para aproximarse al impacto de las actividades humanas en el origen del fenómeno, hubo coincidencias con estos resultados: Guo *et al.* (2015) encontraron, mediante un análisis de regresión logística, que la heterogeneidad de la distribución de los incendios forestales fue causada por la elevación, la cercanía a vías del tren, tipo de bosque y temperatura en las montañas Daxing'an, China; Chas *et al.* (2012) estudiaron el patrón espacial de los incendios en la región de Galicia, España, ellos hallaron que la alta presión demográfica, la propiedad comunal, el elevado número de carreteras y caminos de acceso al bosque incrementan la probabilidad de incendio, mientras que con el establecimiento de plantaciones forestales el riesgo disminuye; Cardille *et al.* (2001) aplicaron la regresión lineal generalizada a variables abióticas, bióticas y humanas

para determinar las que mejor explicaran la actividad de los incendios en la región Upper Midwest, Estados Unidos, ellos resolvieron que la combinación de los tres grupos de variables se relacionaron con la distribución espacial del fuego, pero resaltaron que las zonas con mayor densidad de población, mayor densidad de caminos y menor distancia a zonas no forestales fueron más propensos a las conflagraciones.

3.2 Explicación del comportamiento de las variables

El fuego es producido directamente o propiciado por varias perturbaciones naturales. De entre los grupos de perturbaciones naturales en la superficie terrestre, todos –espaciales, atmosféricos, geológicos y biológicos- lo producen directamente o facilitan su presencia proporcionando condiciones secas o de acumulación de combustibles. Por ello casi siempre ha sido una perturbación natural común, desde el origen de la vegetación terrestre, y muchas especies se adaptaron a este factor ecológico (Rodríguez, 2014). La variable superficie forestal se relacionó positivamente con la ocurrencia de incendios forestales, entre otras cosas, debido a las altas densidades de vegetación que existen en los bosques, lo que incrementa paulatinamente el componente de peligro de incendio relativo a la carga de combustibles listos para arder. Chas *et al.* (2012) refieren que en Galicia, España, el establecimiento de plantaciones forestales disminuyó el riesgo de incendios. En Hidalgo, la SEMARNATH (2011) declara que los bosques son un recurso renovable y representan un eje potencial para el desarrollo económico y social de las áreas rurales de la entidad, si son sometidos a un manejo técnico sus beneficios sociales, económicos y ambientales pueden ser continuos y crecientes. Pero se tiene una

ubicación cercana a la mayor concentración de población, actualmente hay poca superficie bajo manejo (20,000 ha), limitada inversión, reducida producción (20,000 m³/año), con una moderada creación de empleos (150), baja generación de ingresos (13 millones de pesos) y aporta menos del 1% al Producto Interno Bruto. Entonces, como consecuencia del escaso manejo que tienen los bosques en el estado, la cama de combustibles se incrementa año con año debido a la edad y la composición de la masa, su densidad, perturbaciones naturales y alteraciones humanas, así como el clima y la productividad del sitio. (Rodríguez, 2014). Por lo tanto, la existencia de grandes masas de vegetación y la falta de manejo silvícola de las mismas, junto con la influencia de la actividad humana, es un factor importante en la ocurrencia de incendios forestales no deseados.

La zona centro y sur del estado posee la mayor concentración de población y un desarrollo económico superior al resto de los municipios del estado, coincidentemente, en ésta área se registra el máximo número de incendios. El desarrollo de la región implica el impulso de programas de actividades productivas mejor remuneradas que generen ingresos suficientes para que las familias tengan acceso a mayores niveles de consumo, que además propicien el desarrollo de economías regionales más dinámicas. Al respecto, la región registra grado alto de desarrollo humano en promedio (asociado a un PIB *per cápita* alto) (PNUD, 2014). En los últimos años, las actividades agropecuarias han adquirido relevancia para abastecer las necesidades alimentarias de la población, por lo tanto, ha sido necesario disponer de mayor superficie. Las principales razones por las que el ser humano provoca fuego en los bosques involucran el pastoreo en los pastizales

asociados, así como escapes de quemas agropecuarias vecinas a la vegetación, tanto para promover el cambio de uso del suelo como por accidente o por negligencia. Además, los movimientos de las personas con ingresos medios y altos dentro y fuera de su municipio, para disfrutar de las áreas boscosas aledañas a su lugar de residencia, pueden incidir en la ocurrencia de conflagraciones. En bosques de pino que son o sirven como áreas recreativas o que están bajo aprovechamiento forestal, las fogatas de paseantes y trabajadores, así como colillas y cerillos provocan incendios (Rodríguez, 2014).

Los incendios forestales se registran mayormente durante los meses de marzo a mayo de cada año, debido principalmente a los descuidos durante el uso del fuego en las actividades agropecuarias, que coinciden con la época de sequía, así como los descuidos de paseantes y excursionistas durante sus visitas a los bosques. Bajo estas circunstancias es cuando la longitud de caminos y carreteras adquiere una alta relevancia, pues conforme aumenta el número de accesos a las áreas boscosas, la frecuencia de estos eventos tiende a aumentar. Esta relación directa con el número de caminos se puede vincular tanto con la mayor facilidad para acceder diferentes áreas para iniciar un incendio, como con el inicio de incendios por colillas y cerillos mal apagados o no apagados, así como con la quema de la vegetación que en los acotamientos de la carretera realizan compañías privadas o incluso personal municipal. Lo mismo sucede en pinares a orillas de carreteras, donde desde los vehículos se arrojan colillas (Rodríguez, 2014). Un ejemplo de ello se puede ver en la carretera del corredor turístico de Pachuca y en la carretera que

va de Pachuca a Real del Monte, donde año con año es común ver áreas incendiadas a orillas de la carretera.

Actualmente, la SEMARNAT se encarga de restaurar las áreas perturbadas, por incendios forestales y otras causas, por medio de estímulos e incentivos económicos en materia forestal a fin de conducir la política nacional de desarrollo forestal sustentable para conservar y rehabilitar los ecosistemas forestales. En Hidalgo, la CONAFOR y el Gobierno del Estado otorgan apoyos en diferentes rubros: restauración integral, pago por servicios ambientales, desarrollo forestal comunitario, restauración focalizada (SEMARNAT, 2016). Así como sucede en la actualidad, durante los años que abarcó esta investigación se desarrollaron políticas de recuperación de la superficie forestal, pero también de la prevención y la concientización de la importancia de conservar los ecosistemas forestales, por ejemplo, durante 2003-2010 el Gobierno de México asignó 5,289 millones de pesos bajo el esquema de Servicios Ambientales para la ejecución de 4,646 proyectos de conservación, en una superficie de 2 millones 767 mil hectáreas (Iglesias *et al.* 2010). Los recursos de la federación no es el único apoyo que puede recibir un poseedor de terrenos forestales, también existen asociaciones privadas como FIRA, Financiera Rural, Ecobanca, INCA Rural y gobiernos estatales y municipales, entre otros, que fomentan la recuperación de áreas vegetales degradadas. A través de estas acciones es como se puede explicar parcialmente la influencia negativa de la variable superficie de áreas perturbadas en la ocurrencia de incendios forestales. Pues, existen otras opciones como el manejo forestal comunitario, donde muchas comunidades rurales cuidan los terrenos reforestados y activamente participan para

reducir la posibilidad de que un incendio las queme, y otra, como el manejo integral del fuego (Rodríguez, 2000, 2015).

3.3 Índice de peligro de incendios

En la figura 3 se presenta un mapa que expresa, en una escala probabilística comprendida entre 0 y 1, la posibilidad estimada de que en un municipio ocurra un incendio debido a la actividad humana, con base en las variables históricas del modelo.

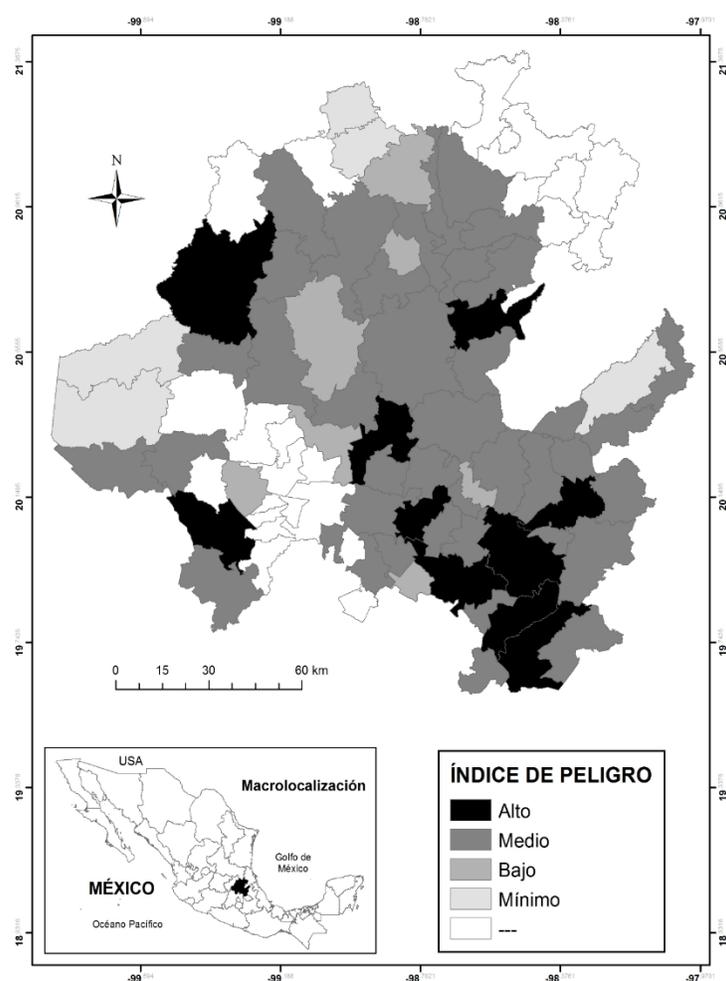


Figura 3. Probabilidad estimada de peligro de incendios forestales para los municipios de Hidalgo.

Los municipios que aparecen en blanco son aquellos que no se consideraron en el análisis por no haber registrado incendios en el periodo de estudio o no tener superficie forestal como es el caso de Tizayuca. Llama la atención que son 39 municipios los que se encuentran en una categoría media y 10 en la alta, estas áreas son de interés en las estrategias de manejo del fuego. Se observa que los municipios con la mayor probabilidad de incendios se ubican en el sureste de la entidad, en las regiones de Apan, Tulancingo y Pachuca, principalmente, pero también en los municipios de Actopan, Tula de Allende, Zacualtipán de Ángeles y Zimapán.

La figura 4 muestra los grados de peligro de incendio forestales para los municipios de Hidalgo, con relación a la superficie por intervalo de peligro y con respecto a la superficie forestal del estado.

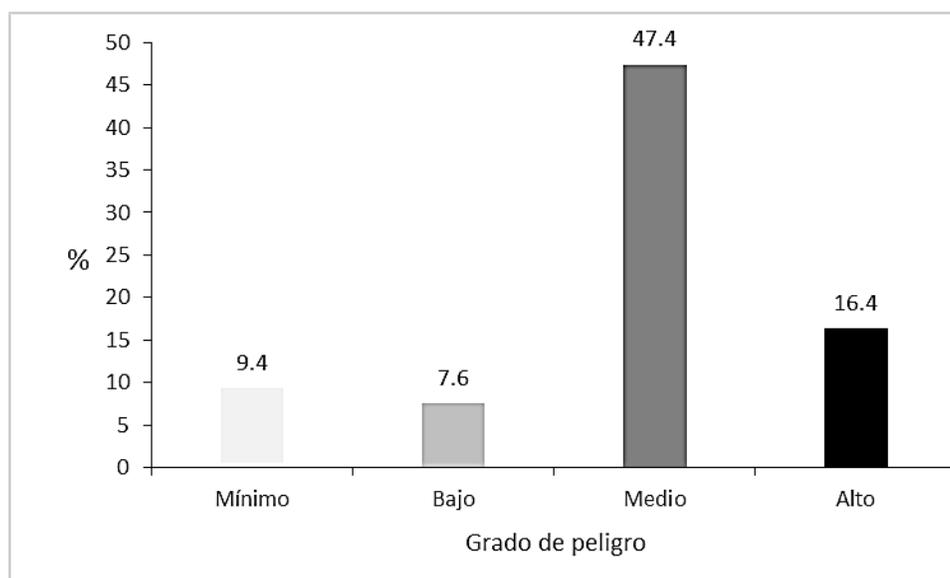


Figura 4. Grado de peligro de incendios forestales para los municipios de Hidalgo.

Con la ecuación resultado del modelo de regresión logística se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de incendios para grupos de municipios que presentan similares valores de las variables en estudio, no se obtiene una probabilidad de aparición del evento distinta para cada uno de los municipios considerados. A continuación, se presentará un ejemplo para explicar cómo se relacionan a la vez las cuatro variables incluidas en el modelo; primeramente la variable *pib_p_c* tomará el valor 0 y se mantendrá constante, y en el segundo ejemplo, la misma variable ahora tendrá el valor 1. Es decir, en el primer caso del ejemplo se tendrá una categoría de producto interno bruto bajo y en la segunda alto. Las demás variables podrán tomar los valores 0 ó 1. Se eligió *pib_p_c*, para tratar de interpretar como se relaciona con las otras variables, pues, aparte de que es una variable de tipo social, en todas las pruebas de correlación y luego de regresión, siempre resultó significativa y con una relación positiva con los incendios forestales (Figura 5).

Es necesario aclarar que se graficaron las probabilidades de la relación entre las cuatro variables, no la probabilidad de cada variable por separado. En estos casos, la fuerza de la asociación entre la variable original y las variables resultado se midió a través del riesgo que supone estar en una categoría (pertenecer a una variable dummy) frente a estar en otra categoría, la cual se tomó como referencia. La leyenda de la gráfica se refiere a una escala de peligro de incendio (Bajo, Medio, Alto), entre paréntesis se señalan los valores que tomaron la superficie de bosque y el área perturbada, 0 ó 1 (Bajo o Alto), respectivamente.

En ambas gráficas, en el primer plano, se puede observar el efecto de la variable longitud de carreteras en la tendencia de las líneas, pues, mientras va aumentando el número de caminos, la probabilidad de incendio también se eleva.

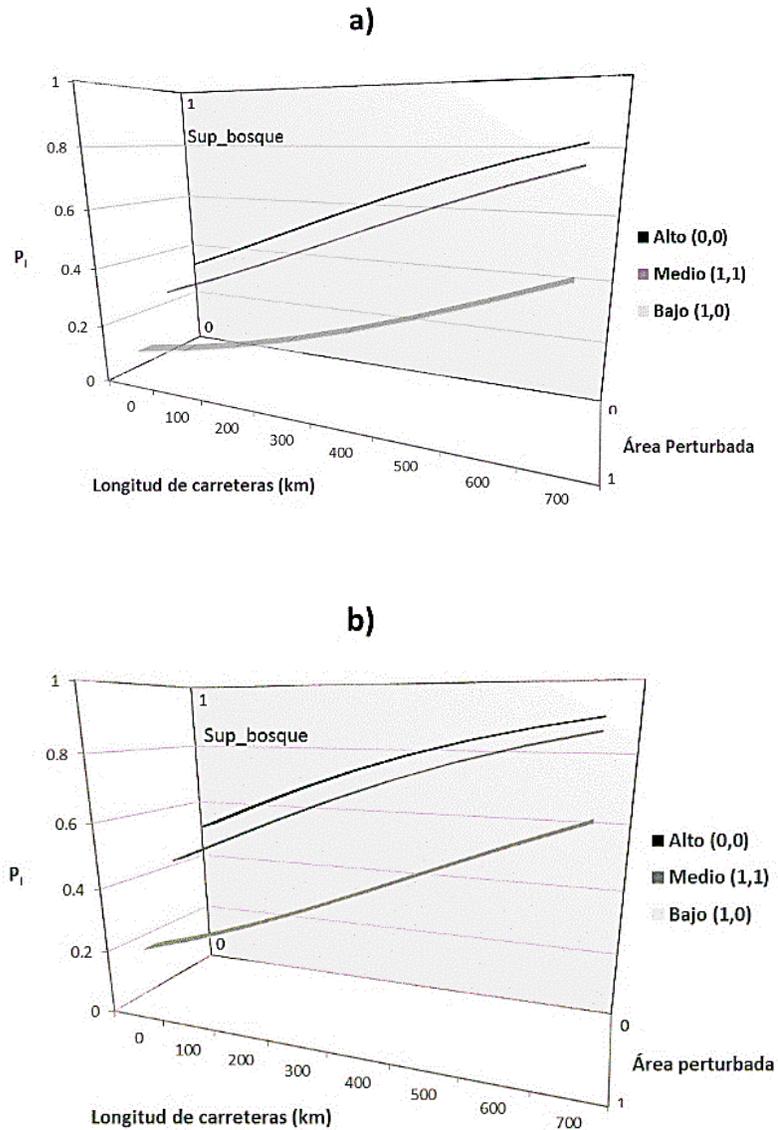


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de incendios.

a) pib_p_c bajo y b) pib_p_c alto.

En el caso de a), donde el PIB *per cápita* tiene un valor bajo, en el plano inferior, es notorio que cuando la superficie de áreas perturbadas toma el valor de uno y el área perturbada de cero, la línea inferior señala el menor valor en la escala de probabilidad, pero conforme aumenta la longitud de carreteras, tiende a elevarse indicando probabilidades más altas. Esta combinación de variables generó un peligro de incendio bajo. Cabe recordar que, de las cuatro variables, el área perturbada fue la única que tuvo una relación negativa con el fenómeno. La línea de en medio es la mezcla de cifras altas en superficie de bosque y área perturbada, dando como resultado un peligro de incendio medio. Finalmente, la línea superior representa un peligro de incendio alto, en donde la superficie de bosque y el área perturbada tuvieron valores bajos. En la gráfica b) se puede interpretar una probabilidad mayor de ocurrencia de incendios en regiones con PIB *per cápita* alto. Al igual que en la gráfica anterior, las variables superficie de bosque y área perturbada tomaron valores bajos y altos, y se obtuvo un comportamiento similar al combinarse con las otras dos variables. En este caso se puede deducir que la variable del PIB *per cápita* tuvo un efecto hacia el aumento de los incendios forestales, pues ahora las tres líneas de peligro de incendio indican probabilidades mayores. Esta figura sugiere que cada variable tiene un efecto aditivo a las demás para explicar el fenómeno.

Es importante comentar que en la realidad nunca sucedió la combinación de que el área perturbada fuera baja y la superficie de bosque alta, esta dupla junto con un número elevado de carreteras y un Producto Interno Bruto *per cápita* alto serían las condiciones ideales para tener un peligro de incendio muy alto.

La figura 6 muestra una comparación visual de las cuatro variables utilizadas en el modelo con base en la categorización hecha en este trabajo. El propósito de este mapa fue confirmar la correcta clasificación las variables.

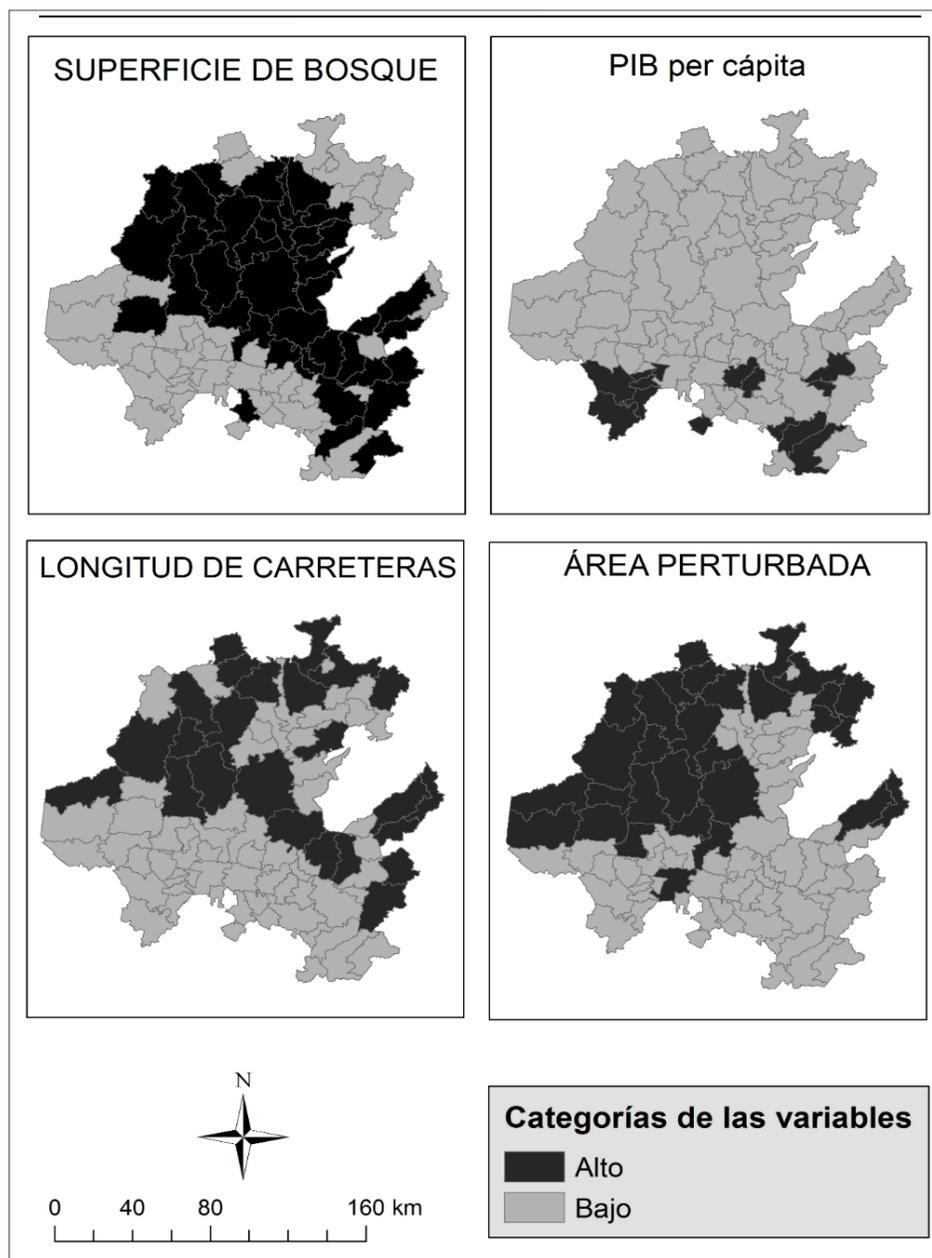


Figura 6. Comparación visual de la clasificación de las cuatro variables consideradas en el modelo estadístico.

Las superficies más extensas de bosque se ubican en la franja de la Sierra Madre Oriental, del noroeste al sureste del estado, esta región se caracteriza por tener alta productividad de biomasa debido al clima templado subhúmedo, una franja de clima semicálido y clima templado húmedo de la zona. La vegetación que predomina son los pinos, encinos, oyameles y táscate, principalmente (INEGI, 2015a). En este tipo de vegetación se acumula mucha hojarasca y hierbas, los cuales sirven de combustible en un incendio forestal. Muchos de los bosques están rodeados por zonas agrícolas y de pastoreo, además de áreas turísticas, en consecuencia se realizan actividades con fuego para preparar los terrenos antes de la siembra o para motivar el crecimiento de renuevo para el ganado o fogatas de paseantes, respectivamente. Lo anterior puede desencadenar un incendio debido al mal manejo del fuego (Rodríguez, 2014).

Los 14 municipios clasificados en este estudio como poseedores de valores altos del PIB *per cápita* se ubican en los límites de Hidalgo y el Estado de México, una zona densamente poblada y de intensa actividad económica. Estos municipios están reportados por el PNUD (2014) en el grupo de muy alto Índice de Desarrollo Humano. Además, en esta área se distribuyen los municipios con alto índice de peligro de incendio obtenido en esta investigación. Lo anterior indica que cuanto mayor es el desarrollo económico de la población, es necesario mayor superficie para satisfacer las necesidades de alimentación, vivienda, esparcimiento, entre otros; en consecuencia, las áreas forestales son desmontadas intencionadamente o no y por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de incendios tiende a aumentar.

La densidad de pavimentado rural, carreteras y caminos tiende a ser extensa en los municipios más grandes, pero en los más desarrollados, que son más pequeños, la longitud relativa a su superficie es alta. El fácil acceso a los bosques está relacionado con la probabilidad de igniciones, pues hay personas que encienden fogatas cerca de los linderos y cuando se van no tiene cuidado de extinguir completamente el fuego, otra causa pueden ser las colillas de cigarros que son arrojados desde los vehículos (Rodríguez, 2014). Es frecuente observar el patrón de incendios cercanos o a un costado de las carreteras. Estas características son comunes sobre todo en la zona de Apan-Tulancingo-Pachuca, en donde hubo mayor correspondencia entre los valores observados y los previstos en el modelo. Posiblemente la afluencia de turismo en primavera, la vegetación y el tiempo seco se conjugan para que se presenten los incendios forestales.

La mayor superficie de área perturbada en la entidad corresponde a los municipios de la zona oeste, norte y noreste del estado, en esta región se distribuye la vegetación árida y semiárida, bosques y selvas, respectivamente; en donde la ganadería es una de las principales actividades económicas (INEGI, 2015a). Una estrategia de algunas instituciones públicas como SEMARNAT y CONAFOR, y otras del sector privado, es contener el avance de la frontera agropecuaria mediante el otorgamiento de apoyos para la restauración y conservación de zonas degradadas, y en general de las áreas con vegetación, esta puede ser una razón por la que las áreas perturbadas estuvieron relacionadas negativamente con los incendios forestales.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró nuevamente la potencialidad de la estadística y de la cartografía del riesgo estructural como herramientas para mejorar el conocimiento sobre los incendios forestales, especialmente necesario en la planificación y diseño de planes de manejo del fuego a escala estatal. El método de la regresión logística es una técnica eficaz para analizar las variables que explican la probabilidad de incendio. Además, con este análisis también se desarrolló un modelo mediante el cual se puede calcular dicha probabilidad para cada factor de riesgo con su estimación poblacional a través del intervalo de confianza, y el valor de probabilidad de aparición de cada uno de los dos eventos de estudio (que ocurra o no un incendio) para cada municipio individual, según presente o no dichos factores. Por otra parte, el análisis de regresión logística se utiliza para la explicación o predicción de eventos que aparecen a lo largo del periodo de estudio, en donde no se evalúa el momento en que aparece. Cada factor de riesgo que se incluya en el modelo, aporta su efecto sobre la variable resultado, sumando su efecto al de los demás factores de riesgo.

Los resultados obtenidos confirman, como era de esperarse, la importancia que tiene la longitud de caminos, pues muestran relación significativa con los incendios. Este modelo de regresión logística demostró que la variable socio-económica PIB *per cápita* tiene un peso significativo en la probabilidad de ocurrencia de incendios, por lo que es importante considerar el factor humano en la evaluación de riesgo de incendios en Hidalgo. Se observa que los municipios con el mayor peligro de incendios se ubican en el sureste de la entidad, en las regiones de Apan, Tulancingo

y Pachuca. En esta zona hay una superficie importante de bosques de pino, oyamel y encino. Pero también una alta densidad de población y carreteras. Los incendios más comunes suceden a bordo de carretera.

Estos resultados sólo son válidos para los municipios de Hidalgo, pues probablemente, algunas de las variables seleccionadas aquí no se encuentren relacionadas con la ocurrencia en otras regiones del país. Se considera que este trabajo debe ampliarse construyendo otros modelos de regresión geográficamente ponderada para cada una de las unidades de estudio para identificar las variables cuyos coeficientes varían significativamente a lo largo del espacio.

El conocimiento de las causas y el riesgo de incendios forestales puede contribuir en la planeación de estrategias de manejo del fuego, tales como prevención, control y combate del mismo, garantizando que los recursos serán dirigidos a las zonas con mayor peligro. Pero es necesario enfatizar que la respuesta debe ser no sólo de un mayor poder para prevenir los incendios no deseados y combatirlos, sino también se requiere una fuerza mucho mayor para estimular el manejo comunitario del fuego, hacer su aplicación ecológico-silvícola, aprovecharle para reducir el peligro de incendio, favorecer la diversidad, entre muchos otros objetivos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Ávila F., D., M. Pompa G., X. Antonio N., D. A. Rodríguez T., E. Vargas P. y J. Santillán P. 2010. Driving factors for forest fire occurrence in Durango state of Mexico: A geospatial perspective. *Chinese Geographical Science*. 20 (6): 491-497.

Cardille, J. A., S. J. Ventura and M. G. Turner. 2001. Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, USA. *Ecological Applications*. 1 (1): 111-127.

Carrillo G., R. L., D. A. Rodríguez T., H. Tchikoué, A. I. Monterroso R. y J. Santillán P. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia*. 37 (9): 678-683.

Carvacho, L. 1998. Evaluación de la estimación de grandes incendios forestales en la cuenca mediterránea europea por redes neuronales y regresión logística. Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía. *Serie Geogr.* 7: 73-85.

Chas A., M. L., J. M. Touza, J. P. Prestemon and C. J. McClean. 2012. Natural and social factors influencing forest fire occurrence at a local spatial scale. *In*: Spano, D., V. Bacciu, M. Salis y C. Sirca (eds.). *Modelling Fire Behavior and Risk*. Global Fire Monitoring Center. Freiburg, Germany. Pp. 181-186.

Chuvieco, E. and R. G. Congalton. 1989. Application of remote sensing and Geographic Information Systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*. 29:147-159.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). 2015. Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM). <http://clicom-mex.cicese.mx/> (10 de agosto 2016).

Cochrane, M. A. 2003. Fire science for rainforests. Nature. 421: 913-919.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2012. Incendios forestales en México. Temporada 2013. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/4339Campa%C3%B1a%20de%20contra%20incendios%202013.pdf> (15 de octubre 2015).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2003. Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Barranca de Metztitlán. México. 202 p.

Departamento de Estadística, Matemática y Cómputo (DEMYC). 2015. Sitio de los Informes Nacionales de Desarrollo Humano en México. http://dicifo.chapingo.mx/demyc/idh/new/bases_new/?mod=nacional&inicio=1995&Consultar=Consultar (25 de febrero 2015).

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2012. Program ArcGis 10.1™ for desktop. Inc. Redlands, CA, EEUU.

Flores, G. J. y S. J. Benavides. 1994. Algunas condiciones que influyen en el riesgo y peligrosidad de los incendios forestales. SARH. INIFAP. México. Folleto Misceláneo núm. 1.

Fulé, P. Z., W. W. Covington, H. B. Smith, J. D. Springer, T. A. Heinlein, K. D. Huising and M. M. Moore. 2002. Comparing ecological restoration alternatives: Grand Canyon, Arizona. *Forest Ecology and Management*. 170: 19-41.

Gómez, J. D., J. D. Etchevers, A. I. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*. 21: 35-56.

Guo, F., J. L. Innes, G. Wang, X. Ma, L. Sun, H. Hu and Z. Su. 2009. 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.

Hosmer, D. W. and S. Lemeshow. 2000. *Applied logistic regression*. Wiley. New York, EEUU. 392 p.

Iglesias, L., E. R. Martínez, S. Graf, C. Muñoz, J. Gutiérrez, F. Flores y P. Bauche. 2010. Pago de servicios ambientales para conservar la biodiversidad. *In*: Carabias, J., J. Sarukhán, J. de la Maza y C. Galindo (Coords.). *Patrimonio natural de México: Cien casos de éxito*. CONABIO. México. Pp. 176-177.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2015. Parque Nacional El Chico. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/108/hgo.html#top> (15 de octubre 2015).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012a. *Perspectiva estadística Hidalgo*. Diciembre 2012. Aguascalientes, Ags., México. 95 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2012b. Áreas geoestadísticas municipales, 2012, escala 1:250000. Marco Geoestadístico 2013 versión 6.0c (Inventario Nacional de Viviendas 2012). Aguascalientes, Ags., México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015a. Información por entidad: Hidalgo.

http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/recursos_naturales.aspx?tema=me&e=13 (20 de octubre 2015).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015b. Productos: Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo.

http://buscador.inegi.org.mx/search?requiredfields=cve_titgen:13&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a_inegi_politica_p72&lr=lang_es|lang_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260&ulang=es&ip=10.210.100.253&access=p&entqrm=0&ud=1&q=+inmeta:Entidad%3DHidalgo&dnavs=inmeta:Entidad%3DHidalgo (15 de mayo de 2015).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015c. Productos: Cartas de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000.

http://buscador.inegi.org.mx/search?requiredfields=cve_titgen:3587&client=ProductosR&proxystylesheet=ProductosR&num=10&getfields=*&sort=meta:edicion:D:E::D&entsp=a_inegi_politica_p72&lr=lang_es%7Clang_en&oe=UTF-8&ie=UTF-8&entqr=3&filter=0&site=ProductosBuscador&tlen=260&ulang=es&ip=10.152.21.8

[&access=p&entqrm=0&ud=1&q=+inmeta:escala_ficha%3D1%253A250%2520000](#)
[&dnavs=inmeta:escala_ficha%3D1%253A250%2520000](#) (5 de octubre 2015).

Johnson, R. A. and D. W. Wichern. 2007. Applied multivariate statistical analysis. 6a. ed. Pearson Prentice Hall. NJ, EEUU. 794 p.

Kitzberger, T. 2003. Regímenes de fuego en el gradiente Bosque-Estepa del noroeste de Patagonia: variación espacial y tendencia temporal. *In*: Kunst, C., S. Bravo y J. L. Panigatti (eds.), Fuego en los ecosistemas argentinos. Ediciones INTA. Argentina. Pp. 79-92.

Martínez, A., J. G. Flores y J. D. Benavides. 1990. Índices de riesgo de incendio en la Sierra de Tapalpa, Estado de Jalisco. *Ciencia Forestal en México*. 15(67): 3-34.

Muñoz, C.A.; E.J. Treviño; J. Verástegui; J. Jiménez y O.A. Aguirre. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas*, 56:101-117

Pérez V., G., M. A. Márquez L., A. Cortés O. y M. Salmerón M. 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*. 19(2): 37-58

Programa de las Naciones Unidas para de Desarrollo (PNUD). 2006. Indicadores de Desarrollo Humano y Género en México. D. F. México. 274 p.

Programa de las Naciones Unidas para de Desarrollo (PNUD). 2009. Indicadores de Desarrollo Humano y Género en México 2000-2005. D. F. México. 465 p.

Programa de las Naciones Unidas para de Desarrollo (PNUD). 2012. El Índice de Desarrollo Humano en México: cambios metodológicos e información para las entidades federativas. D. F. México. 20 p.

Programa de las Naciones Unidas para de Desarrollo (PNUD), 2014. Índice de Desarrollo Humano Municipal en México: nueva metodología. D. F. México. 104 p.

Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven. 1996. Introduction to wildland fire. 2nd ed. Wiley. New York. EEUU. 808 p.

Randell, J. 2008. Ordenamiento ecológico territorial regional en los municipios donde se ubica el Parque Nacional Los Mármoles. Consejo Estatal de Ecología. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DQ006. D.F. México.

Rodríguez T., D. A. 2000. Educación e incendios forestales. Mundi Prensa, UACH. México, D. F. 201 p.

Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M., H. Tchikoué y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. Revista Ciencia Forestal en México. 33(104): 37-58.

Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, C. Cíntora G., R. Contreras A. y A. de la Rosa V. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. Agrociencia. 45: 593-608.

Rodríguez T., D.A. 2014. Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia. Vol. 1. Ed. C.P., C.P., UACH, US FS, USAID, Gob. Edo. Tabasco, FMCN, PNPIF, AMPF, ANCF, PNPI, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP. México. 891 p.

Rodríguez T., D.A. 2015. Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia. Vol. 2. Ed. C.P., C.P., UACH, US FS, USAID, Gob. Edo. Tabasco, FMCN, PNPIF, AMPF, ANCF, PNPI, SEMARNAT, CONAFOR, CONANP. México. 814 p.

Román C., R. M. and J. Martínez V. 2006. Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, Mexico. Conservation Biology. 20(4):1074-1086.

Statistical Analysis System (SAS). 2002. Programa para microcomputadoras (v9.0). SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2001. Inventario Forestal Nacional 2000. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. Ordenamientos Ecológicos expedidos: Hidalgo. <http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamiento-ecologico/ordenamientos-ecologicos-expedidos> (5 de enero 2016).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2016. Apoyos 2015. Programa Nacional Forestal PRONAFOR. Áreas elegibles. Hidalgo. <http://www.conafor.gob.mx/web/apoyos/apoyos-2015/> (10 de diciembre 2015).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Hidalgo (SEMARNATH). 2011. Programa estatal forestal 2011-2016. Secretaría de Planeación, Desarrollo Regional y Metropolitano del Gobierno del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo. 51p.

Servicios Forestales de Hidalgo (SERFORH). 2010. Estudio regional forestal de la Unidad de Manejo Forestal 1305 "Jacala-Tlahuiltepa". Hidalgo. 385 p.

Whelan, R. J. 1995. The ecology of fire. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 360 p.