



Universidad Autónoma del Estado de México

**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y
Recursos Naturales**

**EVALUACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A INCENDIOS
FORESTALES EN BOSQUES DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO
DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

Presenta:

Mario Fermin Castañeda Rojas

El Cerrillo Piedras Blancas; Toluca, Estado de México. Julio de 2013.



Universidad Autónoma del Estado de México

**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y
Recursos Naturales**

**EVALUACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES
EN BOSQUES DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

Presenta:

Mario Fermin Castañeda Rojas

Comité de Tutores

Tutor académico

Dr. Angel Rolando Endara Agramont

Tutores Adjuntos

Dra. María de Lourdes Villers Ruíz

Dr. Eufemio Gabino Nava Bernal

El Cerrillo Piedras Blancas; Toluca, Estado de México. Julio de 2013.

DEDICATORIA

Es mi deseo dedicarle el presente trabajo a mi familia,
quienes permanentemente me apoyaron con espíritu alentador,
contribuyendo incondicionalmente a lograr las metas y objetivos propuestos.

Resumen

Se evaluaron las zonas vulnerables a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México, mediante un muestreo dirigido bajo criterios de densidad de cobertura, incidencia de incendios forestales, accesibilidad al sitio y un gradiente altitudinal. Se establecieron 30 sitios de muestreo, 10 en bosque denso, 10 en semidenso y 10 en fragmentado, en los cuales se identificaron los factores físico-geográficos y antrópicos que influyen en la vulnerabilidad a incendios, mediante inventarios forestales y de combustibles, evaluación de intervenciones antrópicas y fitosanitarias, así como un análisis histórico de la ocurrencia de estos siniestros. Aplicando un análisis de componentes principales (ACP) se determinaron los parámetros de mayor importancia en la investigación. Los resultados demuestran, que el número de individuos en el bosque denso es de 387 ha^{-1} , en semidenso 347 ha^{-1} y en fragmentado 261 ha^{-1} y la cantidad de combustible muerto es de 25.13 t ha^{-1} , 23.95 t ha^{-1} y 33.81 t ha^{-1} respectivamente, evidenciando la reducción de individuos y la elevada cantidad de combustible en bosques fragmentados. Se identificó que en el 2008 se presentaron mayor número de siniestros afectando 173 ha^{-1} ; sin embargo, en el 2011 a pesar de que no fue el año con mayor número de eventos, si fue el más devastador, afectando cerca de 547 ha^{-1} . El ACP indica que las actividades forestales y pecuarias están relacionadas con la cantidad de carga de combustible y con la presencia de incendios históricos que en su conjunto son los parámetros de primer orden que condicionan la vulnerabilidad a incendios en la zona de estudio. Por lo anterior, se recomienda la implementación de acciones dirigidas a la práctica eficaz de aclareos y saneamientos que incluya la remoción y aprovechamiento de materia combustible muerto; la estricta penalización hacia la extracción ilegal de madera y el acondicionamiento o apertura de zonas exclusivas para el pastoreo.

Summary

Vulnerable areas to forest fires were evaluated in high mountain forests of the State of Mexico, through sampling criteria of coverage density, incidence of forest fires, accessibility to the site and an altitudinal gradient. Thirty sampling sites were established, ten sites in dense forest, ten sites in semi-dense forest and ten sites in fragmented forest, in which physical, geographical and anthropic factors were identified that have influenced to fire vulnerability such as forest and fuels inventory, evaluation of anthropic and phytosanitary interventions, and a historical analysis of the occurrence of these incidents. Applying principal component analysis (PCA) determined most important parameters in this thesis. The results show that the number of individuals in the dense forest is 387 ha⁻¹, 347 ha⁻¹ semi-dense and fragmented 261 ha⁻¹ and the amount of dead fuel is 25.13 t ha⁻¹, 23.95 t ha⁻¹ and 33.81 t ha⁻¹ respectively. This evidence indicates the reduction of individuals and the high number of fuel fragmented forests. It also was identified that in 2008, there was a higher number of accidents affecting 173 ha⁻¹, in contrast, 2011 although, it was the year with the highest number of events, whether it was the most devastating, affecting about 547 ha⁻¹. The PCA indicates that forestry and livestock activities are related to the amount of fuel load and the presence of historic fires which together are the first-order parameters that influence vulnerability to fires in the study area. Therefore, we recommend the implementation of actions aimed at effective practice of thinning and sanitation that includes removal and dead fuel material use, the strict penalties towards illegal logging and conditioning or open areas for grazing.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el financiamiento de mis estudios.

A la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), por haberme dado la oportunidad de ingresar al sistema y cumplir este sueño.

Al Instituto en Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), por brindarme todo el respaldo institucional.

Al Dr. Angel R. Endara Agramont, por brindarme las herramientas necesarias para estudiar el ámbito forestal, pero sobre todo, por ser un ejemplo profesional e inculcarme, que la perseverancia y amor por la profesión, marcan la diferencia. Gracias “Rolo”.

A la Dra. Lourdes Villers Ruíz, por aceptarme, por creer en mí y por enseñarme lo valioso que es estudiar los incendios forestales. Muchas gracias doctora y disculpe los corajes que le ocasioné.

Al Dr. Gabino Nava Bernal, por sus comentarios siempre tan acertados. Gracias tío.

Al M. en C. Álvaro Chávez Durán, por su incondicional apoyo en la realización de análisis de combustibles forestales.

Al Dr. Carlos G. Martínez, por su ayuda en temas estadísticos.

A todo el equipo incansable de la “alta montaña” (Angel, Noé, José, Marlen, Desiderio, Enrique, Rosalba, Jorge Luis, Carlos Rubén, Claudia y Willieme), gracias por todo el tiempo juntos y las enormes enseñanzas. Agradezco muy especialmente a Martha Cedillo, por ser el motivo más importante para lograr mis objetivos. A todos...gracias banda.

Al Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF), por permitirme realizar mi estancia de investigación en sus instalaciones. Dra. Marisol Toledo, Ms. Daniel Espinoza, Ing. J. Carlos Licon, Ing. Alfredo Alarcón, Dra. Nataly Azcarrunz, Estela Quintero Vallejo, Laly Domínguez, Sandra Velasco, Jacqueline Tapia y Fabiola Clavijo...Muchas Gracias.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, no necesito nombrar a todos, porque tanto ellos como yo, sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo, pero sobre todo cariño y amistad.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
Resumen.....	IV
Summary	V
AGRADECIMIENTOS	VI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Bosque de alta montaña.....	3
2.2 Ecología del Fuego.....	5
2.3 Incendios Forestales	7
2.3.1 Incendio superficial	8
2.4 Vulnerabilidad a incendios forestales.....	9
2.5 Factores físico-geográficos y antrópicos que intervienen en el estudio de la vulnerabilidad a incendios forestales	10
2.5.1 Densidad, estructura y regeneración forestal	10
2.5.2 Carga de combustible	11
2.5.3 Incidencia a Incendios Forestales.....	15
2.5.3.1 Causas de un incendio	15
2.5.4 Accesibilidad.....	16
2.5.5 Perturbación ambiental.....	17
2.5.5.1 Plagas forestales y plantas parásitas en bosques de alta montaña	18
2.5.5.2 Quemas prescritas	20
2.5.5.3 Sistema roza, tumba y quema.....	21
2.5.6 Topografía del terreno	22
2.5.6.1 Altitud	22
2.5.6.2 Exposición de ladera	23
2.5.6.3 Pendiente del terreno	24
2.6 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotointerpretación como herramientas para la evaluación de vulnerabilidad a incendios forestales	24
3. PROBLEMA	26
4. JUSTIFICACIÓN	27
5. HIPÓTESIS	28
6. OBJETIVOS	28
6.1 General	28
6.2 Específicos	28
7. MATERIALES Y MÉTODOS	29

7.1	Área de estudio.....	30
7.2	Fotointerpretación de densidad de cobertura.....	30
7.3	Selección e instalación de los sitios de muestreo	30
7.4	Caracterización de los factores físico-geográficos y antrópicos	33
7.4.1	Topografía del terreno.....	33
7.4.1.1	Altitud, exposición y pendiente del terreno.....	33
7.4.2	Accesibilidad.....	34
7.4.3	Perturbación Ambiental.....	35
7.4.4	Inventario forestal	36
7.4.4.1	Variables de medición para individuos ≥ 2.5 cm de DAP	37
7.4.4.1.1	Diámetro a la altura de pecho (DAP)	37
7.4.4.1.2	Altura total y fuste limpio	37
7.4.4.1.3	Diámetro de copa	38
7.4.4.1.4	Tocones	38
7.4.4.2	Variables de medición para la regeneración.....	38
7.4.4.2.1	Diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura.....	38
7.4.4.3	Variables de medición para el sotobosque	39
7.4.4.3.1	Diámetro y altura.....	39
7.4.5	Densidad del Bosque.....	40
7.4.6	Inventario de combustible forestal	40
7.4.6.1	Evaluación de combustibles forestales gruesos y finos.....	41
7.4.6.2	Calculo de carga de combustible Forestal	42
7.4.7	Análisis espacio-temporal de los incendios forestales (2006-2012).	43
7.4.7.1	Procesamiento de las Bases de Datos (BD).....	43
7.4.7.2	Indicador de frecuencia	44
7.4.7.3	Indicador de gravedad	44
7.5	Análisis estadísticos	44
8.	RESULTADOS.....	45
9.	CONCLUSIONES GENERALES	65
10.	LITERATURA CITADA.....	67
11.	LISTA DE CUADROS	74
12.	LISTA DE FIGURAS	75
13.	ANEXOS.....	76
	Anexo 1. Formulario para inventario forestal	76
	Anexo 2. Formularios de regeneración y sotobosque	77

Anexo 3. Formularios para inventario de combustible	78
Anexo 4. Ecuaciones para el cálculo de carga de combustible	79

1. INTRODUCCIÓN

La alta montaña en México se establece en zonas volcánicas distribuidas a lo largo del Sistema Volcánico Transversal (SVT) (Montero, 2004). En el Estado de México se extienden sierras y volcanes aislados, como es el caso de Sierra de las Cruces, volcán Xinantecatl y parte del volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl.

Estas zonas albergan a los bosques de alta montaña (BAM), ecosistemas forestales capaces de adaptarse a condiciones de altitud y temperatura extremas (Eguiluz, 1978; Benitez, 1988; Campos, 1993), ya que se desarrollan sobre los 3 500 msnm, representados principalmente por poblaciones de *Pinus hartwegii*. Estas zonas están íntimamente relacionados con la provisión de servicios ambientales a la Ciudad de México y su zona metropolitana (Endara *et al.*, 2013).

Estos ecosistemas se han reducido progresivamente, originando problemas ecológicos, económicos y sociales. Entre los factores de mayor degradación están: aprovechamientos forestales mal planeados, extracción ilegal, incendios forestales, pastoreo y contaminación atmosférica (Villers *et al.*, 1998; Encina *et al.*, 2008; Endara *et al.*, 2013).

Muchos de los incendios forestales acontecen en pinares (Rodríguez, 2001), en BAM el 80% de éstos son provocados por el hombre (PROBOSQUE, 2012) y más del 50% se deben a las actividades agropecuarias (Sosa *et al.*, 1999).

Si bien es cierto que los incendios generan consecuencias negativas para los ecosistemas, también ayudan a la apertura de conos de pinos serótinicos para liberar la semilla, favorecen la penetración de luz en el bosque, aumentando la fotosíntesis, y propiciando la inmediata disponibilidad de algunos nutrientes contenidos en las cenizas de los residuos orgánicos (Rodríguez, 1996).

Los incendios forestales son procesos complejos, condicionados por factores físico-geográficos y antrópicos interrelacionados entre sí (Capó, 1999), por lo tanto, los BAM presentan cierta vulnerabilidad a incendios; sin embargo *Pinus hartwegii* es una especie adaptada al fuego, estimándose la ocurrencia de incendios naturales cada cinco años

(Rodríguez, 2001; Vélez, 2009), en pero, los periodos de incendios provocados por el hombre pueden ser anuales (Rodríguez y Fulé, 2003).

Castillo y colaboradores (2003) mencionan que muchos incendios forestales ocurren en zonas que anteriormente no sufrían de fuegos, mientras que en zonas que presentaban regímenes periódicos de fuego, los incendios se han suprimido, indicando que el fuego perturba cada vez más áreas que históricamente no sufrían el disturbio.

Una forma de evaluar el grado de vulnerabilidad que tiene el ecosistema forestal ante el fuego, es mediante la caracterización de la topografía, estructura y composición de la vegetación, material combustible muerto, vías de acceso, historial de incendios y actividades antrópicas en el bosque y sus vecindades (Capó, 1999; Flores *et al.*, 2008).

La utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de fotointerpretación, representan una herramienta fundamental en la temática de incendios, no solo para caracterizar de manera básica las condiciones del territorio, sino también para particularizar aspectos ecológicos y de perturbación (Villers *et al.*, 1998; Endara, 2007; 2010; Endara *et al.*, 2012).

Por lo anterior, se analizó la vulnerabilidad que tienen los bosques de alta montaña del Estado de México a incendios forestales, mediante levantamientos en campo en los que se identificaron y caracterizaron los factores físico-geográficos y antrópicos presentes en la zona, aunado con la utilización de los sistemas de información geografía y técnicas de fotointerpretación. De esta manera se pretende que la información generada aporte herramientas en la generación de programas preventivos a incendios forestales en la alta montaña.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Bosque de alta montaña

Los bosques de alta montaña representados por *Pinus hartwegii* se desarrollan sobre los límites superiores del gradiente altitudinal arbóreo (3 500 – 4 100 msnm) (Endara *et al.*, 2013); sin embargo existen registros de individuos sobre los 4 200 m (Campos, 1993; García, 2013), ya que es la única especie capaz de establecerse en esas condiciones ambientales (Cuadro 1). Los individuos en su etapa adulta llegan a medir 25 m de alto y 70 cm de diámetro, sus ramas bajas son perpendiculares al fuste y presentan copa gruesa y redondeada (Eguiluz, 1978; Perry, 1991; Endara *et al.*, 2012).

Esta especie es objeto de diferentes denominaciones según su ubicación geográfica: ocote, pino amarillo y/o pino chino, ocote blanco y ocote pardo (Eguiluz, 1978). En su conjunto, estos bosques ocupan solo el 1 % del territorio nacional en masas puras y abiertas (Arriaga y Gómez, 2004) (Figura 1).



Figura 1. Bosque de *Pinus hartwegii* semidenso, Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan, 2012.

Debido a la cercanía de estas zonas con grandes aglomeraciones urbanas, los problemas ambientales son similares: el cambio de uso de suelo, los incendios forestales, fragmentación y deforestación de sus bosques, prácticas de manejo de la tierra,

aprovechamientos forestales mal planeados y pastoreo (Madrigal, 1992; Encina *et al.*, 2008).

Rodríguez (2001), menciona que el exceso de fuego en las partes más elevadas, puede implicar la eliminación del estrato arbóreo, pues esta especie marca el límite altitudinal para los árboles en México.

Cuadro 1. Tipo de bosque con relación a un gradiente altitudinal

Altitud (msnm)	Tipo de Bosque	Vegetación
4 000 – 4 800	No hay bosque	Zacatonales y epífitas
3 200 – 4 100	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	Gimnospermas, zacatonales y epífitas
2 700 – 3 200	Bosques mixtos de alta montaña semihúmedos y subhúmedos	Angiospermas, gimnospermas y epífitas
1 800 – 3 000	Bosques nublados	Angiospermas ¹ , Gimnospermas ² , epífitas ³ y xerófitas

¹ Vegetales con flores y semillas, ² Plantas leñosas con hojas verdes todo el año, ³ Líquenes y musgos. Citado en Montero, 2004.

El bosque de alta montaña se desarrolla sobre los pisos altitudinales térmicos “helado” y “subnevado” (Cuadro 2), ya que para su desarrollo deben existir características climáticas semifrías, con temperaturas medias anuales de entre 5 a 12 °C, con precipitaciones medias anuales del orden de 967 a 1 200 mm, régimen de lluvias en verano y con menos de 5 % de la precipitación en invierno (Mendoza, 1977; García, 1981; Benitez, 1988). Los suelos que habita son andosoles, podzoles (Aguirre y Rey, 1980; Benitez, 1988).

Cuadro 2. Pisos altitudinales térmicos de la alta montaña mexicana

Altitud (msnm)	Piso Altitudinal térmico	Temperatura media anual	Días con heladas al año	Precipitación media anual (mm)
5 610 – 4 800	Nevado	3 °C	365	Sin datos
4 800 – 4 000	Subnevado	1 °C	330 a 350	Sin datos
4 000 – 3 300	Helado	5 °C	195 a 320	1 800
3 300 – 2 700	Frío	9 °C	115 a 200	1 700
2 700 – 2 400	Semifrío	13 °C	65 a 120	1 600

Citado en Montero, 2004.

Entre los componentes del sotobosque se encuentran *Penstemon gentianoides*, *Eupatorium glabratum* y *Baccharis conferta*, formando un ralo estrato arbustivo. Entre otras especies, en el estrato herbáceo se presenta *Muhlenbergia quadridentata*, *M. macroura*, *Festuca toluensis*, *F. hephaestophila*, *Lupinomontani-calamagrostion toluensis* (Figura 2; a) y *Lupinus* spp. (Figura 2; c), comprendidas entre los 4 000 y 4 800 msnm, (Almeida *et al.*, 2004).

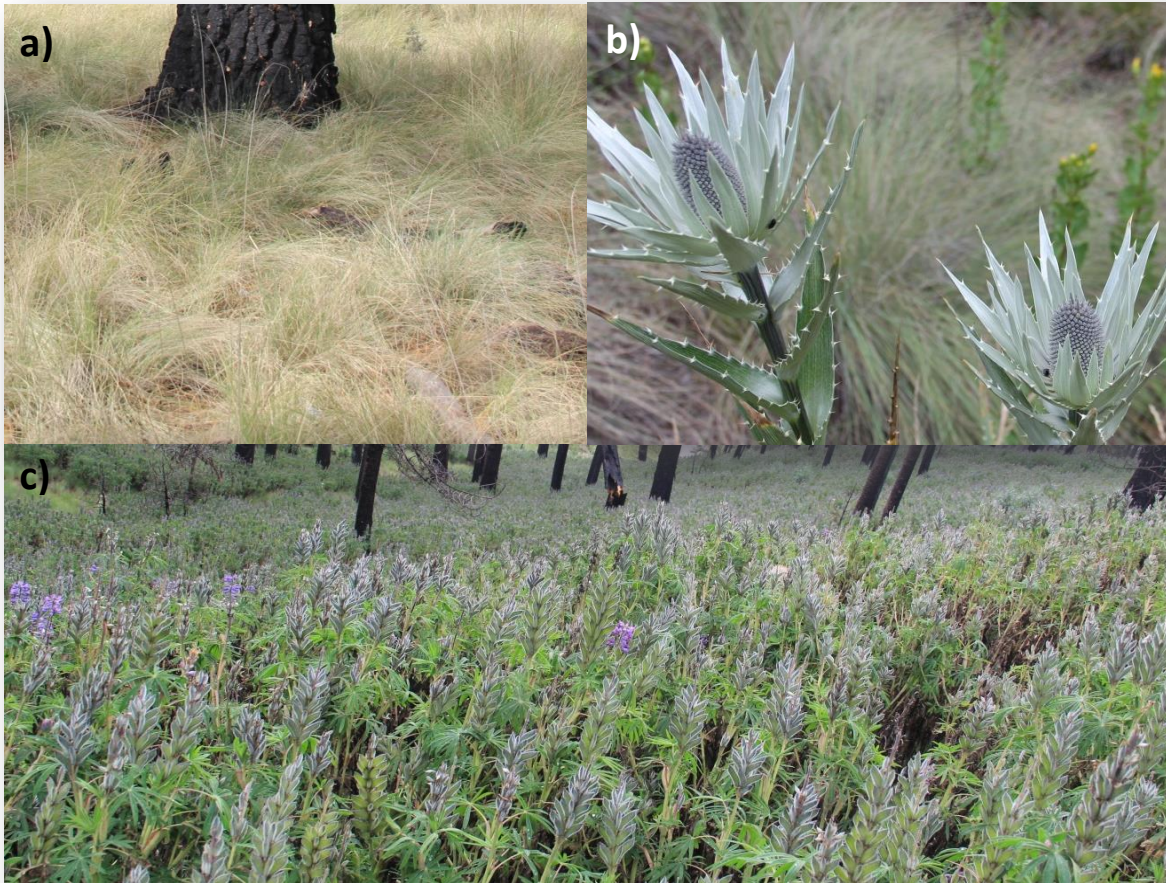


Figura 2. Sotobosque de alta montaña; a) Pastizal alpino (*Lupinomontani-calamagrostion toluensis*); b) Rosa de la montaña (*Eryngium proteaeflorum delarf*); c) *Lupinus* spp

2.2 Ecología del Fuego

El bosque es una de las formas de vida fisionómicas básicas, por medio del cual las comunidades bióticas pueden ser clasificadas y caracterizadas por la predominancia de plantas leñosas. Una de las formas más simples en la que se puede definir al bosque, es

considerándolo directamente en función de los árboles que lo componen y que son los que le dan a la comunidad su fisionomía característica, en este caso el bosque de alta montaña representado por *Pinus hartwegii*.

Tomando en cuenta que los incendios forestales son uno de los siniestros más frecuentes en los bosques, surge la ecología del fuego. Parte de la ecología que se encarga de estudiar el efecto del fuego en los distintos componentes de los ecosistemas forestales, y las interrelaciones que en éstos tienen los seres vivos, entre sí y su ambiente físico (Rodríguez, 1996).

Los incendios de origen humano eran escasos cuando sólo unos centenares de hombres habitaban el Valle de México, y es claro que se incrementaron seguramente con el aumento de la población (Rodríguez, 1996), ya que, en gran parte del mundo moderno los seres humanos han sido la causa más importante de los incendios.

En la América Precolombina, los indígenas regulaban muchos incendios forestales. Los europeos los imitaron. Debido a su alta intensidad y frecuencia, estos incendios, a menudo asociados con la tala, desmonte y pastoreo, han cambiado la característica de los bosques y afectado la calidad de la localización (Spurr y Barnes, 1980).

Por tanto, el patrón que surge para los estudios de la historia de los incendios está basado en el concepto de ocurrencia cíclica del incendio, determinado primariamente por factores físico-geográficos y antrópicos. En intervalos anormalmente largos entre los incendios, regularmente se concentran grandes cantidades de material combustible y ante una situación de incendio, éste será de mayor intensidad (Spurr y Barnes, 1980).

De 1900 a 1940 se desarrollaron actividades organizadas para la protección contra los incendios (Spurr y Barnes, 1980), sin embargo, a partir de la temporada crítica de incendios de 1998, en México se impulsaron una serie de acciones dirigidas a fortalecer las capacidades nacionales para la protección contra incendios forestales y el manejo del fuego, incorporando en esta tarea a diversas dependencias, organizaciones civiles y centros de educación e investigación (Morfín *et al.*, 2012).

2.3 Incendios Forestales

Un incendio forestal es la perturbación que, con una ocurrencia y propagación no controlada del fuego, afecta bosques, selvas y vegetación de zonas áridas y semiáridas, (Villers y López, 2004). Rodríguez (1996), lo define como la propagación libre del fuego sobre la vegetación forestal.

Los incendios forestales, son siniestros ampliamente extendidos en los ecosistemas terrestres del mundo. Todos los años grandes superficies de bosques, selvas, matorrales y pastizales se incendian (Schultz *et al.*, 2008) y el fuego es, por lo tanto, un factor importante en la dinámica y configuración de estos paisajes (McKenzie *et al.*, 2011).

La frecuencia, intensidad y patrón de quemado son irregulares, controlados principalmente por el clima, el tipo de materiales combustibles y sus características físicas y químicas, la cantidad de los mismos, su grado de compactación, distribución espacial en el plano horizontal y en el vertical, la combustibilidad y la topografía (Rodríguez, 1996; Sosa *et al.*, 1999; Morfín *et al.*, 2012).

En un bosque en crecimiento, el incendio es claramente una perturbación que interrumpe y altera drásticamente el desarrollo de la localización existente. Sin embargo, desde el punto de vista de las comunidades y especies dependientes del fuego, el incendio es un factor natural cuyos efectos han sido incorporados desde hace tiempo a las adaptaciones de las especies y la dinámica del ecosistema (Spurr y Barnes, 1980).

El fuego es la liberación de energía en forma de luz y calor producida por la combustión de materia vegetal viva o muerta. Para que el fuego se produzca se requiere de tres elementos, que forman el llamado “triángulo del fuego”, combustible, calor y oxígeno (Rodríguez, 1996; CENAPRED, 2001) (Figura 3).



Figura 3. Triángulo del Fuego

2.3.1 Incendio superficial

En México más del 90% de los incendios son de tipo superficial y alcanzan temperaturas entre los 200 y 300 °C. Este tipo de incendio consumen combustibles gruesos y finos (ramas, troncos derribados y hojarasca), pastizales y arbustos que se encuentran entre la superficie terrestre, quemando la base de los árboles y hasta 1.5 metros de altura, deteriorando en gran medida la regeneración natural y la reforestación (Sosa *et al.*, 1999).

Este deterioro, está condicionado por la intensidad del incendio, la cantidad de árboles y arbustos muertos, la cual depende de la especie, la edad y el hábito de enraizamiento. Los pinos jóvenes pueden sucumbir a un incendio superficial, mientras que los individuos adultos sobreviven debido a la mayor protección que le brinda al cambium una corteza más gruesa y una altura de copa muy por encima de las que alcanzan las llamas (Rodríguez, 1996).

Los incendios superficiales intensos pueden dañar el cambium y dejar una cicatriz. Estas evidencias en los árboles indica en forma de registro, la frecuencia de los incendios en una localización simple (Spurr, 1954). Estos registros de frecuencia de incendios son testigos típicos para la mayor parte de los bosques, con la probabilidad de que al menos algunos incendios superficiales leves no se hayan detectado en el periodo investigado.

2.4 Vulnerabilidad a incendios forestales

Los estudios sobre incendios en México se han realizado bajo distintos enfoques, los cuales contemplan tres aspectos: a) los estudios sobre el efecto del fuego en las comunidades vegetales, b) las actividades de combate de incendios y prevención en las que intervienen labores para disminuir tanto el peligro como el riesgo de incendios y, c) el uso del fuego como herramienta silvícola (Villers y López, 2004; Wong, 2011).

Sin embargo, analizar la vulnerabilidad de un bosque al fuego es de suma importancia; en este contexto, la vulnerabilidad a incendios forestales es la susceptibilidad o predisposición intrínseca de algún ecosistema a ser afectado seriamente por fuego, aunado al factor interno de riesgo, esta situación depende principalmente de la actividad humana (Hardy, 2005).

Por su parte Botello y colaboradores (2010), la define como el grado en que un ecosistema natural o social podría resultar afectado por algún fenómeno ambiental, en este caso, por los incendios forestales; condicionados por factores físico-geográficos y antrópicos (densidad del arbolado, cantidad de combustibles, exposición de ladera, pendiente del terreno y la cercanía a caminos, terracerías y brechas).

En estos términos, Villers y López (2004), mencionan que de cierta manera la vulnerabilidad de los bosques de pino aumenta debido a su cercanía con las áreas agrícolas, poblados y caminos, además de que son áreas menos húmedas y con mayor exposición a la radiación solar.

La vulnerabilidad no es general, sino que debe entenderse en función de cada tipo de amenaza que podría sufrir dicho ecosistema. Generalmente los términos riesgo, peligro y amenaza, se utilizan erróneamente como sinónimos.

El riesgo a incendios forestales, se refiere a la probabilidad de ignición (natural o antrópica) y la propagación del fuego, determinada principalmente por las condiciones del estado del tiempo. El peligro por su parte, es el potencial comportamiento del fuego y la severidad de sus efectos sobre los ecosistemas, así como la resistencia de los incendios a los esfuerzos de combate o supresión; el peligro está determinado por la distribución horizontal y vertical

de los combustibles, la inflamabilidad, compactación y tamaño del material que puede encenderse y mantener la propagación del fuego (Hardy, 2005).

La amenaza está dada por acciones derivadas de la interacción de la actividad humana y la naturaleza, que son provocadas por el abuso y el descuido del hombre en su relación con el medio ambiente, por ejemplo, no practicar silvicultura preventiva (Guzmán y Rodríguez 2008).

La principal meta de la evaluación de la vulnerabilidad es plantear recomendaciones sobre determinadas acciones para reducir la susceptibilidad que tienen los bosques de alta montaña a ser alterados por agentes exógenos, mediante la evaluación de las características físico-geográficas y antrópicas que presentan, considerándose indispensables cuando se piensa realizar acciones preventivas contra los incendios.

2.5 Factores físico-geográficos y antrópicos que intervienen en el estudio de la vulnerabilidad a incendios forestales

De acuerdo a la literatura citada, existen diversos factores físico-geográficos y antrópicos que intervienen en el estudio de vulnerabilidad a incendios en los BAM, éstos se describen a continuación:

2.5.1 Densidad, estructura y regeneración forestal

La identificación de densidades de cobertura del bosque mediante técnicas de fointerpretación, han sido la base de diversas investigaciones (Villers *et al.*, 1995; Villers y López, 1996; Villers *et al.*, 1998; Regíl, 2005; Franco *et al.*, 2006). Tomando como referencia la cobertura de copa de individuos por hectárea, se considera bosque denso a aquella superficie que presenta 80 a 100% de cobertura de copa, bosque semidenso 50 a 80% y bosque fragmentado < 50 % (Regíl, 2005) (Figura 4).

La estructura forestal es la abundancia y la dispersión espacial de los árboles clasificados por tamaño y/o edad (Veblen, 1992; Endara, 2010). La estructura horizontal es la distribución espacial de individuos en determinada área, la cual permite conocer la cantidad de árboles por clase diamétrica (Siteo y Riveiro, 1995) y la estructura vertical es la

conformación de biomasa a lo largo del perfil vertical del ecosistema, estrechamente relacionado con la altura de los árboles (Louman *et al.*, 2001).

Lo anterior permite dividir a un conjunto de árboles en estratos: superior, intermedio, e inferior (Steubin *et al.*, 2001).

Finalmente, la regeneración es el proceso por el cual se incorporan nuevos individuos a la población reproductora, mientras otros van desapareciendo como consecuencia de la mortalidad natural o inducida. Este proceso implica la producción, dispersión, germinación de semillas y el establecimiento de la repoblación natural en un suelo forestal (Harper, 1977).



Figura 4. Densidad Forestal: a) Denso, b) Semidenso y c) Fragmentado. Ladera Suroeste del PNNT, 2000.

2.5.2 Carga de combustible

Los combustibles forestales son toda materia orgánica que está presente en los montes y disponible para la combustión en los incendios forestales, incluyendo la biomasa de plantas vivas y sus partes (follaje, tallos y ramas, raíces), así como sus restos (también llamados necromasa), que incluyen troncos de árboles muertos en pie o caídos, residuos leñosos (Figura 5) y hojas que se encuentran en el mantillo, así como la materia orgánica del suelo (Chandler *et al.*, 1983; Flores y Benavides, 1994; Rodríguez, 1994; 1996; Pyne *et al.*, 1996; CENAPRED, 2001; Arnaldos Vigers *et al.*, 2004; Morfín, 2012).



Figura 5. Combustible forestal grueso muerto: a) 1 hora, b) 10 horas, c) 100 horas y d) 1000 horas

La carga de combustible es la cantidad de material muerto en base seca por unidad de superficie, la cual se puede expresar en diferentes unidades: toneladas por hectárea (ton/ha), toneladas por acre (t/a), libras por pie cuadrado (lb/ft²) (Guzmán y Rodríguez, 2008). Esta cantidad combustible varía en función de la etapa sucesional del bosque, de su altitud y tipo de disturbio presente (Rodríguez, 2001) y se clasifican en gruesos y finos (Flores y Benavides, 1994; Porrero, 2000; Villers, 2006)

Los combustibles muertos, están asociados al diámetro del material y al tiempo que tardan en alcanzar el equilibrio con la humedad ambiental, denominado “tiempo de retardo” (Foresberg, 1971). Conforme el combustible es más grande, perderá o ganará humedad más lentamente; es decir, tendrá un mayor tiempo de retardo (Foresberg, 1971; Villers, 2006). De esta manera, se tienen combustibles de 1, 10, 100 y 1 000 horas, cuyos diámetros varían

de 0 a 0.6, 0.61 a 2.5, 2.51 a 7.5 y mayores a 7.5 cm respectivamente (Figura 6) (Villers, 2006; Flores *et al.*, 2008) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de combustibles forestales gruesos

Relación del diámetro de combustibles con el tiempo de retardo		
Clase	Tamaño (cm)	Ejemplo
1 hora	< 0.6	Ramillas
10 horas	0.61 a 2.5	Ramillas y ramas
100 horas	2.51 a 7.5	Ramas
1000 horas	> 7.5	Troncos

Adaptado de Rodríguez *et al.*, 2002.

Existen diferentes modelos de combustibles (Cuadro 4), que tienen aplicación prácticamente universal. Basados en el tamaño, disposición, calidad y cantidad de la vegetación, los cuales permiten valorar la vulnerabilidad, velocidad de avance y tipo de incendio (Rothermel, 1983; ICONA, 1987).

Cuadro 4. Modelos de combustible sobre el que progresa el incendio forestal (Rothermel, 1983).

Grupo	Modelo	Descripción
Pastos	1	Pasto fino, seco y bajo, que cubre completamente el suelo. Pueden aparecer algunas plantas leñosas dispersas ocupando menos de 1/3 de la superficie. Cantidad de combustible (materia seca): 1-2 ton/ha.
	2	Pasto fino, seco y bajo, que recubre completamente el suelo. Las plantas leñosas dispersas cubren de 1/3 a 2/3 de la superficie, pero la propagación del fuego se realiza por el pasto. Cantidad de combustible (materia seca): 5-10 ton/ha.
	3	Pasto grueso, seco, denso y alto (>1m). Es el modelo típico de las sabanas y de zonas húmedas de clima templado-cálido. Los campos de cereales son semejantes a este modelo. Puede haber algunas plantas leñosas dispersas. Cantidad de combustible (materia seca): 4-6 ton/ha.
	4	Matorral o plantación joven muy densa; >2 m de altura; con ramas muertas en su interior. Propagación del fuego por las copas. Cantidad de combustible (materia seca): 25-35 ton/ha.
	5	Matorral denso y verde, >1 m de altura. Propagación del fuego por la hojarasca y el pasto. Cantidad de combustible (materia seca): 5-8 ton/ha.
Matorral	6	Parecido al modelo 5, pero con especies más inflamables o con restos de corta. Propagación del fuego con vientos moderados a fuertes. Cantidad de combustible (materia seca): 10-15 ton/ha.
	7	Matorral de especies muy inflamables; de 0.5 a 2 m de altura,

		situado como sotobosque en masas de coníferas. Cantidad de combustible (materia seca): 10-15 ton/ha.
	8	Bosque denso sin matorral. Propagación del fuego por hojarasca muy compacta. El bosque denso de pino silvestre o de haya son ejemplos. Cantidad de combustible (materia seca): 10-12 ton/ha.
Hojarasca bajo arbolado	9	Parecido al modelo 8 pero con hojarasca menos compacta formada por acículas largas y rígidas o follaje de frondosas de hojas grandes. Son ejemplo las masas de rodeno, castaño o rebollo. Cantidad de combustible (materia seca): 7-9 ton/ha.
	10	Bosque con gran cantidad de leña y árboles caídos, como consecuencia de vendavales, plagas, etc. Cantidad de combustible (materia seca): 30-35 ton/ha.
Restos de corta y de otras operaciones selvícolas	11	Bosque claro o fuertemente aclarado. Restos de poda aclaro dispersos, con plantas herbáceas rebrotando. Cantidad de combustible (materia muerta): 25-30 ton/ha.
	12	Predominio de los restos sobre el arbolado. Restos de poda o aclaro dispersos, con plantas herbáceas rebrotando. Cantidad de combustible (materia seca): 50-80 ton/ha.
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos y pesados, cubriendo todo el suelo. Cantidad de combustible (materia seca): 100-150 ton/ha.

Retomado de Vélez, 2000.

Una de las principales herramientas utilizadas en la investigación de los incendios, es el inventario de combustibles forestales, el cual se basa en la técnica de intersecciones planares (Brown, 1974; Brown *et al.*, 1982; Sánchez y Zerecero, 1983). La cual consiste en determinar la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca que se acumulan en el bosque en forma natural y/o por efecto de cortas de arbolado, mediante el conteo de piezas leñosas intersectadas por un plano vertical, marcándose en el terreno por una línea de muestreo (transecto).

En diferentes ecosistemas forestales de México, se ha demostrado la aplicación de esta técnica (ya que es relativamente sencilla) no requiere de un diseño de muestreo complicado, además de que el análisis de los datos se reduce a una serie de cálculos aritméticos y una estadística elemental, obteniendo resultados significativos (Vera, 1980; Zapata, 1991; Muños *et al.*, 2001; Rentería *et al.*, 2005; Nájera y Hernández, 2007; Wong y Villers, 2007).

2.5.3 Incidencia a Incendios Forestales

Existen diversas investigaciones que están orientadas hacia los patrones de distribución espacial que siguen los incendios (Yang *et al.*, 2007) y las variaciones de ocurrencia histórica (Drury y Veblen, 2008; Kellogg *et al.*, 2008); evidenciando que la historicidad de los siniestros es importante para determinar un posible régimen del fuego en el ecosistema, (Badía, 1998; Miranda, 2000; Ávila *et al.*, 2010).

La vulnerabilidad a incendios está basada, entre otros factores, en los registros históricos donde ha ocurrido el siniestro. Cuando estas zonas se espacializan en un mapa, se puede observar su concentración y distribución (Show y Clarke, 1953). Moreno (1989) y Chuvieco (1998), consideran que las zonas con mayor incidencia de fuego son aquellas áreas con combustibles muchos más uniformes.

2.5.3.1 Causas de un incendio

La causalidad de incendios forestales, debe entenderse como elemento clave para analizar los factores condicionantes en la ocurrencia del siniestro, es evidente que la mayoría de los incendios están ligados, de una u otra forma, a las actividades humanas (Martín *et al.*, 1998a).

Las motivaciones que mueven a las personas que provocan incendios forestales son muy variadas (Vélez, 1983). En el Estado de México las causas están clasificadas en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Clasificación de causas de incendios forestales en el Estado de México.

Clave	Causa
1	Actividades Agropecuarias
2	Actividades Forestales
3	Otras Actividades productivas (Industrial, Maquilas, etc.)
4	Limpia de derechos de vía
5	Fumadores
6	Fogatas de paseantes
7	Quema de basureros
8	Litigios
9	Rencillas
10	Para obtener autorización de aprovechamiento forestal
11	Cazadores furtivos

12	Descargas eléctricas
13	Cultivos ilícitos
14	Ferrocarril
15	No determinadas

PROBOSQUE, 2012.

Es importante mencionar el elevado porcentaje de incendios debido a negligencias o acciones imprudentes, como: quema de pastos, operaciones agrícolas o forestales en las que se hace uso del fuego con escasa precaución, fogatas mal apagadas, cerillos y colillas arrojadas encendidas, etc. (Martín *et al.*, 1998a). Actividades frecuentes en los bosques de alta montaña del Estado de México.

2.5.4 Accesibilidad

Los bosques de alta montaña, están siendo perturbados por diversas actividades antrópicas, la cuales requieren necesariamente vías de acceso y de transporte, lo que ha dado lugar a la apertura de caminos; éstos traen consigo diversos beneficios económicos, sociales y de conservación (Ramírez *et al.*, 2005). Sin embargo la apertura de los caminos, desencadenan una serie de perturbaciones a los ecosistemas sobre los que atraviesa en el momento de su construcción, a corto y largo plazo.

Las actividades humanas destructivas como incendios provocados y extracción excesiva o ilegal de los recursos (como es el caso de las brechas de saca) producen un deterioro constante en los bosques (Gutman, 1986; Reid, 1997; Spellerber, 1998 y 2002; Peñaranda, 2000; Ramírez *et al.*, 2005) (Figura 6). Más aún, algunas de estas brechas se transforman en caminos de terracería que soportan la rodada de pesados camiones que extraen la madera con fines comerciales, sobre todo de *Pinus hartwegii*, apreciada por su constitución dura y densa (Montero, 2004).



Figura 6. a) *Pinus hartwegii* dañado por quema en la base del tronco, PNNT. b) Terracería en Sierra de las Cruces. c) Evidencia de corte en *Pinus hartwegii*, PNNT.

Las zonas susceptibles a quemarse están situadas a lo largo de las carreteras principales, terracerías, brechas y veredas, en los lugares en que se realiza una explotación maderera intensiva y donde las áreas agrícolas y de pastoreo están contiguas a tierras forestales (Show y Clarke, 1953; Villers y López, 2004).

2.5.5 Perturbación ambiental

Flores y colaboradores (2008), la definen como aquella actividad o factor que modifica la vegetación (en estado original) de un ecosistema. Esta perturbación puede ser positiva o negativa.

Los BAM están siendo perturbados por diversas actividades: la tala inmoderada, quema de pastizales con fines de pastoreo (desarrollada principalmente en invierno para obtener renuevos en primavera, matando los brotes de pinos recién germinados y sustituyendo bosques por zacatonos) (Figura 7), el empleo del fuego para la habilitación de terrenos cultivables que incluye, la quema de rastrojos y restos de poda (Ern, 1973; Martín *et al.*, 1998a; Endara, 2010)



Figura 7. Actividades de pastoreo en el PNNT y Sierra de las Cruces, 2012.

Los efectos sobre el bosque pueden observarse en dos niveles: la pérdida de los recursos y el detrimento de la calidad del ambiente; ya que el calor del fuego induce la muerte de los tejidos y deformaciones en los árboles, reduciendo con ello la calidad de su madera, propiciando el debilitamiento del tronco y la invasión de plagas y enfermedades forestales (Matthews *et al.*, 2000; Castro *et al.*, 2003; CONAFOR, 2012).

2.5.5.1 Plagas forestales y plantas parásitas en bosques de alta montaña

Dependiendo de la intensidad del fuego en un ecosistema forestal, éste puede tener consecuencias positivas y/o negativas. Por un lado, genera un efecto sanitario en el ecosistema, debido a que si el fuego alcanza a quemar la corteza del árbol, elimina en un porcentaje importante la población de descortezadores por largos periodos de tiempo (Miller y Patterson, 1927; Roger, 1996; Fonseca *et al.*, 2007).

Sin embargo, los árboles dañados por el fuego, también pueden presentar reducciones del crecimiento, la disminución del vigor y mayor probabilidad de que se establezcan insectos descortezadores, dependiendo del nivel de chamuscado (Pérez, 1981).

González y Rodríguez (2004) reportan que *Pinus hartwegii* con un chamuscado de 30 a 60% de la copa tienen un crecimiento en diámetro similar a los árboles que no sufrieron daño; con un chamuscado mayor al 60%, el crecimiento se reduce hasta el 13%; y con

chamuscado menor al 30%, el crecimiento del árbol se estimula hasta en un 32% más que el testigo.

Los incendios forestales considerados como ligeros, rara vez matan a los árboles adultos, pero pueden producir la pérdida de algunos árboles jóvenes que mueren durante el siniestro o a consecuencia de la subsecuente infestación de insectos descortezadores (Miller y Patterson, 1927; Furniss, 1965; Cibrián *et al.*, 1995; Suckling *et al.*, 2001; Sullivan *et al.*, 2003).

Después de un incendio las poblaciones de descortezadores aumentan en forma considerable, volviendo posteriormente a los niveles que tenían antes del incendio (Miller y Patterson, 1927).

En los BAM, las plantas parásitas, como el muérdago enano *Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens subsp. *Grandicaule* y *Arceuthobium vaginatum* (Willd) Presl. subsp. *vaginatum*, aunado a plagas forestales como el descortezador (*Dendroctonus adjunctus* Blandford Coleoptera: Scolytidae) (Figura 8), se han convertido en una de las principales causas de disminución en la producción de madera, reduciendo el crecimiento, rendimiento y calidad de la misma (Hawksworth, 1983; Nava *et al.*, 2009).



Figura 8. Plagas forestales y plantas parásitas en bosques de alta montaña. a) Muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens subsp. *Grandicaule*), b) Muérdago enano (*Arceuthobium vaginatum* (Willd) Presl. subsp. *vaginatum*) y c) Descortezador (*Dendroctonus adjunctus* Blandford Coleoptera: Scolytidae).

2.5.5.2 *Quemas prescritas*

Es la aplicación controlada de fuego a combustibles, bajo condiciones ambientales específicas, que llevan a confinar el fuego en un área predeterminada y, al mismo tiempo, producir una intensidad calorífica y tasa de propagación requerida para atender los objetivos planteados (Chandler *et al.*, 1983; Rodríguez, 1996).

En diversas partes del planeta, y con diferente intensidad respecto a su uso, las quemas prescritas se emplean en la preparación del terreno, promoviendo la regeneración natural o artificial, para facilitar el acceso durante la reforestación, en el manejo de la composición de especies, sucesión y competencia, limpia de residuos de aprovechamiento, producción de forraje para el ganado, manejo de hábitat para la fauna silvestre, control de plagas, enfermedades, plantas parásitas y como medida preventiva y/o presupresiva ante incendios forestales (Spurr y Barnes, 1980; Flores y Benavides, 1994; Rodríguez, 1996; Fonseca, 2007; Espinoza *et al.*, 2008) (Figura 9).



Figura 9. Quema prescrita como medida preventiva a Incendios Forestales inducidos, con fines de pastoreo en el ejido de Santa María del Monte dentro del PNNT, 2012.

A pesar de su versatilidad, las quemas prescritas no son una panacea, y mal aplicadas en cuanto a extensión, ubicación, intensidad, época del año, frecuencia, tipo de vegetación, estado del tiempo atmosférico o al perderse su control, resultan contraproducentes con

consecuencias perjudiciales para el ecosistema y diversos valores que el hombre reconoce en el bosque (Rodríguez, 1996).

Por lo tanto, la actividad humana constituye un importante factor de riesgo. El hombre es responsable, directa o indirectamente, del inicio de la mayor parte de los incendios que se producen (Vélez, 2000).

Sin embargo, comprender cómo, cuándo y con qué objetivos se utiliza; investigar su ecología y los impactos de los incendios; hacer uso del fuego en la administración de ecosistemas para preservarlos o restaurarlos, resultan imprescindibles para entender la ecología del fuego a través de quemas prescritas (Rodríguez *et al.*, 2002).

2.5.5.3 Sistema roza, tumba y quema

Remontarse a los orígenes de este sistema, es remontarse también a los orígenes de la agricultura, ya que este proceso se inició en los ecosistemas fríos y templados de América (Rodríguez, 1996). Este sistema elimina parte de la vegetación, fuese pastizal, matorral o bosque, con herramientas manuales, usando fuego para después cultivar en tierras planas o en laderas de montañas y mantener un uso del suelo agrícola (Verduzco *et al.*, 1961; Vaillant, 1973; Rodríguez, 1996) (Figura 10).

Este sistema formó parte del manejo de los recursos forestales, y fue éste un sistema de manejo inteligente, pues respondía a las condiciones ecológicas del ecosistema forestal, y constituía una organización que permitía evitar el uso intensivo de los suelos del bosque, con fines agrícolas, y asegurar su regeneración (Caballero *et al.*, 1978). Sin embargo, en la actualidad esta práctica constituye un factor de riesgo, principalmente en áreas contiguas a bosque.



Figura 10. Práctica tradicional del sistema roza, tumba y quema en el PNNT, 2012.

Por tal motivo, en México han existido innumerables decretos, reglamentos, planes, programas preventivos, de combate, leyes y políticas; organizaciones, secretarías y asociaciones civiles en beneficio de los bosques y la implementación de medidas que reduzcan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales; pese a ello, dicho fenómeno ambiental sigue sucediendo (Rodríguez, 1996).

2.5.6 Topografía del terreno

La configuración del terreno tiene gran importancia en la ocurrencia de incendios debido a su influencia sobre el clima y los combustibles, ya que a medida en que la altitud aumenta, la densidad forestal disminuye, dando lugar a una escasa acumulación de combustible (Martín *et al.*, 1998a).

2.5.6.1 Altitud

Una de las principales relaciones que pueden existir en un sitio con el aumento de altitud, es el descenso de la presión atmosférica y la temperatura, según el conocido gradiente térmico altitudinal de 0,65 °C/100 m (Serrada, 2008); por lo tanto, en las zonas altas normalmente la altitud mejora las condiciones hídricas de los combustibles (Martín *et al.*, 1998a).

En una montaña se definen 3 zonas estrechamente relacionadas con la cantidad de combustibles forestales, en cada una ellas, la vulnerabilidad a incendios es diferente.

1. En el tercio inferior o parte baja las temperaturas son más altas. Generalmente la cantidad de combustibles es mayor; en consecuencia, se espera gran resistencia al control.
2. Debido a una menor disponibilidad de combustible en el tercio intermedio de una montaña o elevación es común una disminución en la resistencia al control. Sin embargo es importante destacar que durante la noche en este sector se genera un cinturón térmico, el cual se caracteriza porque el promedio de temperatura es más alto, un promedio de humedad más bajo y un índice de peligro mayor.
3. En el tercio superior suceden cambios bruscos de viento. Cerca de la cumbre ocurren interacciones entre los vientos locales y los generales que forman remolinos. Sin embargo, la propagación del fuego en general se reduce porque existe menos combustible.

2.5.6.2 Exposición de ladera

Se define, como la disposición de la ladera con respecto a los puntos cardinales (N, S, E, W). Se mide con brújula y se expresa en rumbos (Serrada, 2008). Para el caso de México, la exposición hacia el sur recibe mayor cantidad de radiación solar; por lo tanto en esos flancos las temperaturas son las más altas, existe menor humedad relativa y los combustibles son más ligeros y secos.

La exposición de ladera determina la cantidad de energía solar que llega a un sitio e influye además, en la pérdida de humedad de los combustibles forestales muertos (gruesos y finos) disponibles a incendiarse (Countryman, 1978; Nelson, 2001; Wong y Villers, 2007).

Según Serrada (2008) las exposiciones se pueden clasificar en:

- *Umbrías*, correspondientes a exposiciones en las que es menor el número de horas de insolación y la radiación que se recibe se produce en las primeras horas del día,

de forma que son áreas con menores temperaturas y evaporación debido a que reciben menor iluminación.

- *Solanas*, corresponde a las exposiciones en las que es mayor la radiación recibida y por tanto la iluminación. Estas áreas tienen mayor temperatura y evaporación

Con base en lo anterior, las laderas situadas al norte (umbría) son más húmedas y frías, mientras que las situadas al sur (solana) son más secas y cálidas. En una montaña a la misma altitud puede haber grandes oscilaciones entre la solana y la umbría, además de la oscilación entre el día y la noche (García y García, 1987).

2.5.6.3 Pendiente del terreno

Se define como el ángulo que forma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno. Es la inclinación o desnivel del suelo, se mide utilizando un clinómetro, evaluando el ángulo que forma la ladera horizontal, expresándose normalmente en grados. Se pueden obtener medidas de la pendiente sobre mapas topográficos con altimetría detallada, aunque en la práctica es más precisa la determinación sobre el terreno (Serrada, 2008).

Esta inclinación que tiene el terreno, influye de manera directa en el comportamiento del fuego, ya que favorece el movimiento del aire caliente por convección; de esta manera se ha comprobado que la velocidad de propagación del fuego se duplica por cada 10% de aumento en la pendiente del terreno (Viegas, 1989).

Al presentarse un incendio forestal en pendientes mayores, la propagación se acelera por estar los combustibles más cerca de las llamas; la fase de precalentamiento incrementa la tasa de combustión y, por lo tanto, se acelera la velocidad de avance del fuego y las pavesas rodantes son más frecuentes originando incendios secundarios (Rodríguez, 1996).

2.6 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotointerpretación como herramientas para la evaluación de vulnerabilidad a incendios forestales

Los incendios forestales dependen de una serie de factores de distinta naturaleza que conjugados, condicionan cierta zona a resultar afectada por el fuego. La fotointerpretación

permite generar parte de esta información, a partir de imágenes de satélite y/o fotografías aéreas para su posterior integración, manipulación e interpretación en un ambiente de SIG (Villers *et al.*, 1995; Villers y López 1996; Villers *et al.*, 1998; Etxeberri *et al.*, 2002; Regíl 2005; Franco *et al.*, 2006).

Estos sistemas se definen como una tecnología integradora que une varias disciplinas, con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización y distribución de información geográfica (Goodchild, 2000; Ordoñez *et al.*, 2003; Gómez y Barredo, 2005).

Una característica fundamental de los SIG es que trabajan con mapas y pueden realizar operaciones de análisis espacial, la cual está constituida por una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de datos georreferenciados y sus atributos almacenados en el propio sistema, posibilitando trabajar con las relaciones espaciales de las entidades contenidas en cada capa temática de la base de datos, permitiendo obtener nuevos mapas a partir de una única fuente de datos (Buzai y Baxendale, 2006).

Los datos espaciales georreferenciados pueden concebirse como un conjunto de mapas de una porción específica de la superficie, cada uno de los cuales representa una variable temática, una vez que esta variable ha sido introducida en el SIG, recibe el nombre de capa temática, en ella se representa una tipología específica de elementos del mundo real (Gómez y Barredo, 2005). Para el caso de estudio, cada una de las capas temáticas serán las variables o factores que determinan el grado de vulnerabilidad a incendios de cierto espacio forestal.

En función de la estructuración de los datos espaciales en un SIG, éste se puede entender como una representación abstracta y estratificada de la realidad, en la cual cada estrato o capa constituye un tema específico, representado por ciertos objetos espaciales que lo definen, tales como puntos, líneas (arcos), áreas (polígonos) o bien celdas (píxeles), dichos objetos espaciales dependen del tipo y estructura de la información.

3. PROBLEMA

El fuego es una de las perturbaciones más frecuentes en los ecosistemas forestales del mundo. En México su presencia se debe en gran medida al factor humano, asociado principalmente a las actividades agropecuarias (CONAFOR, 2009). En los BAM (> 3 500 msnm), los incendios ocasionan todos los años pérdidas económicas, graves efectos ambientales y la degradación del ecosistema.

Estas zonas se encuentran influenciadas por una serie de factores físico-geográficos y antrópicos, los cuales al verse favorecidos por el tiempo atmosférico, hacen vulnerables a estos bosques a sufrir el impacto del fuego.

Entre las actividades que se realizan está el pastoreo, el cual implica la quema de extensos pastizales y zacatón que en sus etapas tempranas de desarrollo son excelente alimento para el ganado. Sin embargo, frecuentemente estas quemadas se salen de control, afectando grandes superficies de bosque. Las diferentes actividades fitosanitarias, generan elevadas cantidades de combustible muerto, las cuales ante una situación de incendio serán consumidas, aumentando la severidad y la resistencia al control.

La red de caminos, terracerías y brechas, es el medio por el cual se ingresa a los bosques, haciendo estas áreas frágiles y susceptibles a ser quemadas o perturbadas por otra actividad.

Si bien los incendios resultan impredecibles en el tiempo, si es posible identificar espacialmente zonas incendiadas. A pesar de que existen diversas medidas preventivas tanto nacionales, estatales y locales, los incendios siguen siendo una constante, encaminando a un escenario futuro en el que las pérdidas pueden seguir aumentando.

4. JUSTIFICACIÓN

Los BAM generan una serie de beneficios ambientales y económicos. Están representados por *Pinus hartwegii*, especie que se adapta a esas condiciones de altitud y bajas temperaturas (Mendoza, 1977; Eguiluz, 1978; García, 1981; Benitez, 1988; Campos, 1993).

Este ecosistema sufre la afectación por diferentes disturbios, entre los que están los incendios forestales. Se estima que durante el periodo 2006-2012, ocurrieron 228 incendios, afectando 1,286 ha divididas entre los estratos de pastos, arbustos, renuevo y arbolado (PROBOSQUE, 2012).

Los incendios ocurren de manera natural y son incluso necesarios en la dinámica de regeneración del bosque; sin embargo, con el aumento e intensidad de actividades antrópicas, los incendios se han incrementado, afectando mayores superficies forestales.

Por lo anterior, esta investigación se justifica en la generación de información actualizada, sobre la identificación y análisis de los factores físico-geográficos y antrópicos que influyen en la vulnerabilidad de estos ecosistemas.

Esta información permitirá entre otras cosas, el desarrollo de modelos espaciales para la zonificación de áreas prioritarias, en las que se apliquen planes y programas preventivos a incendios; identificación de las características físicas de estas zonas; modelación de la continuidad horizontal de combustibles; recolección dirigida de leña y manejo de combustibles muertos, producto de actividades fitosanitarias.

5. HIPÓTESIS

La tala inmoderada, el pastoreo y las actividades fitosanitarias en los bosques de alta montaña del Estado de México, están generando áreas fragmentadas con altas cantidades de combustible. Por tanto, las zonas que presenten evidencia de estas actividades tendrán mayor carga de combustible y una mayor vulnerabilidad a incendios forestales.

6. OBJETIVOS

6.1 General

- Evaluar las zonas vulnerables a incendios forestales en los Bosques de Alta Montaña del Estado de México.

6.2 Específicos

- Determinar los factores físico-geográficos y antrópicos que inciden en las zonas vulnerables a incendios forestales en los bosques de alta montaña del Estado de México.
- Analizar espacial y temporalmente los incendios forestales en la zona de estudio, durante el periodo 2006-2012.
- Analizar la estructura arbórea y sotobosque en la alta montaña del Estado de México.
- Estimar la carga de combustible (finos y gruesos) presentes en los bosques de alta montaña del Estado de México.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron áreas superiores a los 3500 msnm en el Estado de México. Apoyados en los SIG y técnicas de fotointerpretación, se identificaron las zonas históricamente afectadas por el fuego. A partir de ello, se integró una metodología para caracterizar mediante levantamientos en campo, los factores físico-geográficos y antrópicos presentes en los sitios. La figura 11 ilustra el esquema metodológico planteado.

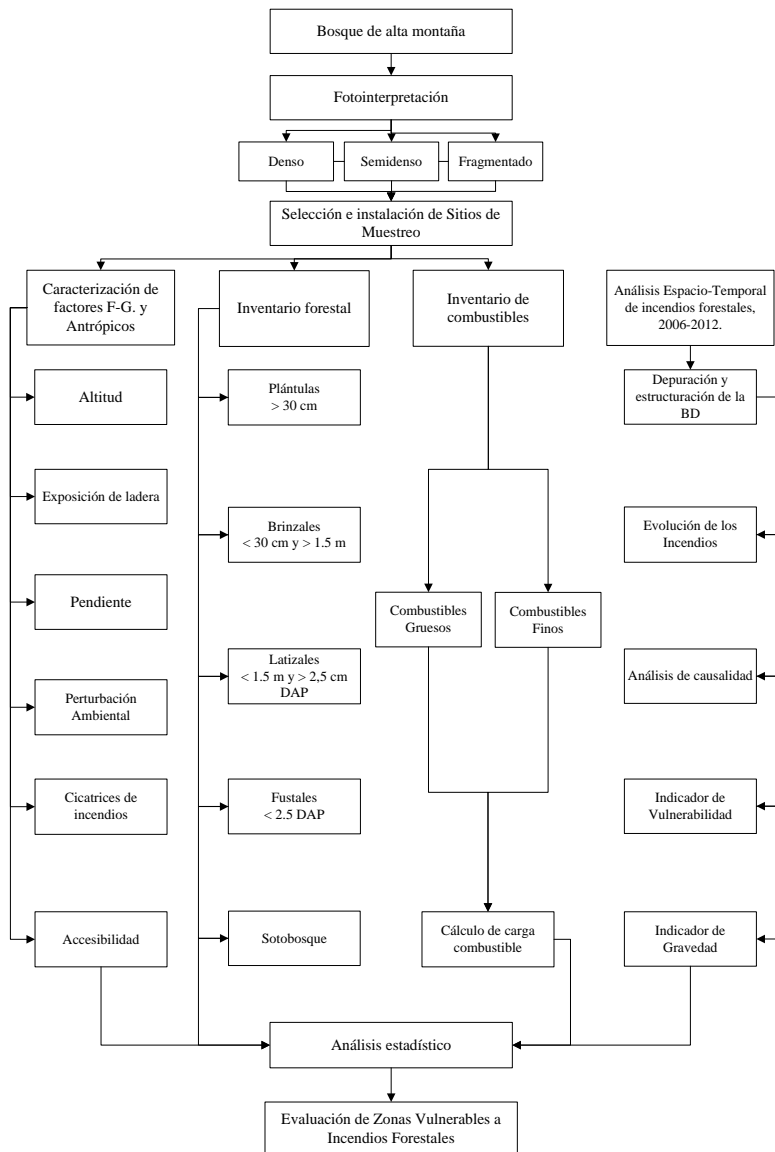


Figura 11. Esquema metodológico general

7.1 Área de estudio

El área se localiza entre los 18°59'01'' y 19°18'50'' latitud norte y los 98°37'30'' y los 99°53'45'' longitud oeste, principalmente en tres zonas: Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), Sierra de las Cruces (SC) y Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan (PNIZ-Pp-Z), entre los 3 500 y 4 200 msnm (Figura 14).

Los BAM están representados por la especie forestal *Pinus hartwegii*, la cual solo se ubica en México y Guatemala (Rzedowski, 1978, 1981; Perry, 1991; Endara *et al.*, 2013). Presentan un clima semifrío, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 5 y 12 °C, con precipitaciones medias anuales de 967 a 1 200 mm, con un régimen de lluvias en verano y con menos de 5 % de la precipitación en invierno (Mendoza, 1977; García, 1981; Benítez, 1988).

7.2 Fotointerpretación de densidad de cobertura

La identificación de tres densidades de cobertura se realizó en un ambiente SIG, mediante la fotointerpretación de imágenes de satélite fusionadas del sensor Spot 5 (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra o Satélite Para la Observación de la Tierra) del año 2010. Haciendo uso del tono, textura y densidad como principales elementos de interpretación en el software ArcGIS 10 y PCI Geomatics (Lillesand y Kiefer, 1994).

Se consideró bosque denso a aquella superficie que presentó entre 80 a 100 % de cobertura de copa, bosque semidenso 50 a 80 % y bosque fragmentado < 50 % (Regíl, 2005; Franco *et al.*, 2006).

7.3 Selección e instalación de los sitios de muestreo

Los sitios de verificación y muestreo se identificaron en gabinete bajo criterios de: a) densidad de cobertura, b) evidencia o reporte de incendio forestal durante el periodo 2006-2012, c) gradiente altitudinal de 3 500 a 3 900 msnm y d) accesibilidad al sitio (Capó, 1999). Teniendo como resultado 10 sitios (1 ha) en bosque denso, 10 en semidenso y 10 en fragmentado (Figura 12).

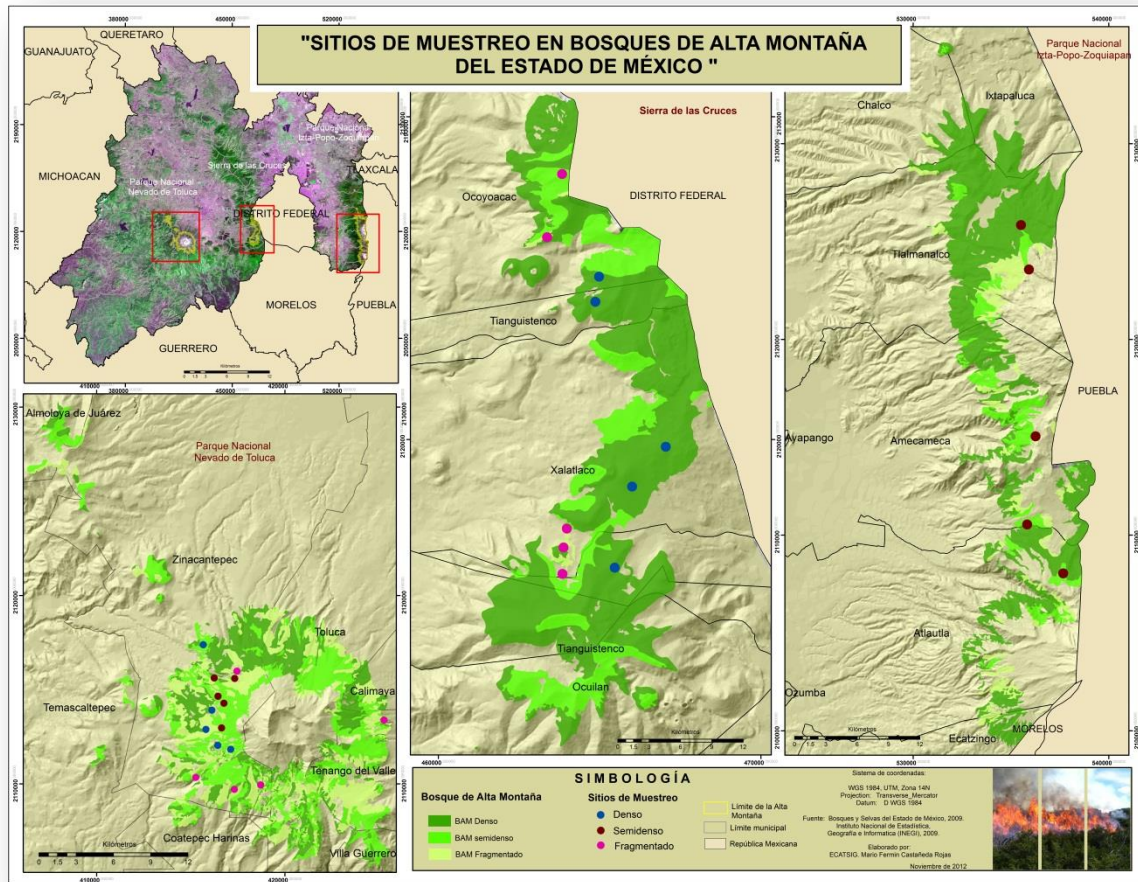


Figura 12. Área de estudio y distribución de sitios de muestreo en BAM del Estado de México

Las coordenadas de los sitios se ingresaron a un GPS marca GPSMAP® 60CS con error de ± 3 metros, ubicándose esta zona en campo. Con ayuda de una BRUJULA-CLINOMETRO TANDEM SUUNTO, estacas de madera de 0.50 metros de alto y cuerdas de diferentes longitudes, se procedió a delimitar e instalar el sitio de muestreo orientado al norte franco (Figura 13),

El sitio tiene una superficie de $1\ 000\ m^2$, que sirvió como límite para la medición de los fustales ($>2.5\ cm\ DAP$). A su vez consta de tres sub-sitios de 3.5 metros de radio cada uno ($18\ m^2$), a una distancia de 8.9 metros y en ángulos de azimut 0° , 120° y 240° a partir del centro del sitio (Flores *et al.*, 2008), los cuales sirvieron para medir el sotobosque (arbustos y pastos) y la regeneración bajo la clasificación de Valdez (2002) (Figura 16).



Figura 13. Delimitación del sitio de muestreo

Cada sub-sitio está conformado por tres transectos de 15 metros, distribuidos en ángulos de azimut 0° , 120° y 240° . Éstos fueron seccionados a los 3.5, 7 y 15 metros, que sirvieron para el inventario de combustibles gruesos de 1, 10, 100 y 1 000 horas; finalmente en el extremo de cada transecto se instaló un cuadrante de 30 x 30 cm en el cual se evaluó el combustible forestal fino (acículas).

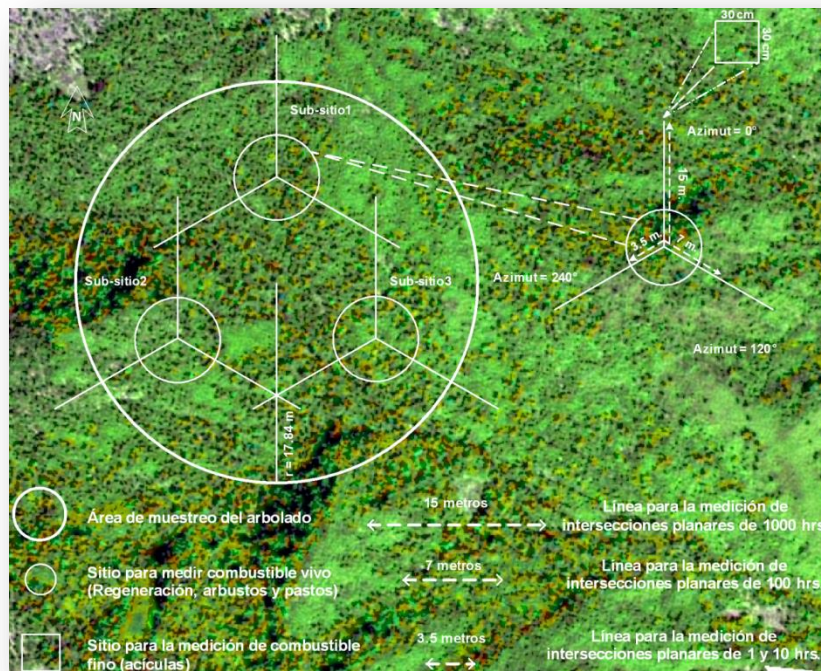


Figura 14. Diseño del sitio de muestreo (Flores *et al.*, 2008).

7.4 Caracterización de los factores físico-geográficos y antrópicos

La vulnerabilidad a incendios es una situación que se encuentra condicionada por una serie de factores que van desde los físicos hasta los antrópicos (Guzmán y Rodríguez, 2008); siguiendo con esta idea, se describen éstos factores y su forma de evaluación.

7.4.1 Topografía del terreno

7.4.1.1 Altitud, exposición y pendiente del terreno

Con ayuda del GPSMAP® 60CS (Figura 15a) y de una BRUJULA-CLINOMETRO TANDEM SUUNTO (Figura 15b), se obtuvieron parámetros físicos como altitud, exposición de ladera y pendiente del terreno.



Figura 15. a) GPSMAP® 60CS y b) BRUJULA-CLINOMETRO TANDEM SUUNTO

Cuadro 6. Datos de ubicación de los sitios de muestreo

Sitio	X	Y	Z	Pendiente (grados)	Exposición (grados)
1	416687	2113268	3811	7	55
2	415664	2117388	3640	9	30
3	416658	2113707	3848	15	195
4	416560	2112068	3855	9	180
5	417089	2112180	3915	11	230
6	465741	2117566	3532	7	150
7	466005	2118542	3612	11	130
8	467049	2119774	3627	8	100
9	464734	2124444	3610	12	230

10	464983	2125046	3681	10	240
11	416448	2114652	3810	15	230
12	416861	2116243	3770	4	300
13	416761	2114282	3861	15	210
14	416636	2112972	3880	25	240
15	417857	2115630	3870	7	280
16	535843	2110524	3638	14	310
17	535510	2125840	3684	19	25
18	535917	2123572	3950	9	40
19	536304	2115071	3917	21	240
20	537666	2108043	3898	6	275
21	465842	2120561	3563	7	350
22	463992	2117248	3560	4	310
23	463522	2115548	3600	2	325
24	462899	2114810	3718	10	200
25	465180	2117252	3560	8	45
26	415884	2109187	3600	17	170
27	417566	2116177	3780	15	90
28	416624	2109280	3650	22	120
29	418241	2110095	3850	10	260
30	425386	2113493	3563	15	75

Datos obtenidos en campo

7.4.2 Accesibilidad

Con apoyo de los SIG se identificaron en gabinete los principales accesos a las zonas de muestreo. Las vías de acceso son un elemento importante a incluir, se ha comprobado que la apertura de caminos favorece al deterioro, sobre todo dentro de ecosistemas forestales (Ramírez *et al.*, 2005) (Figura 18). Mediante recorridos en campo se caracterizó el tipo de acceso (carretera y camino).

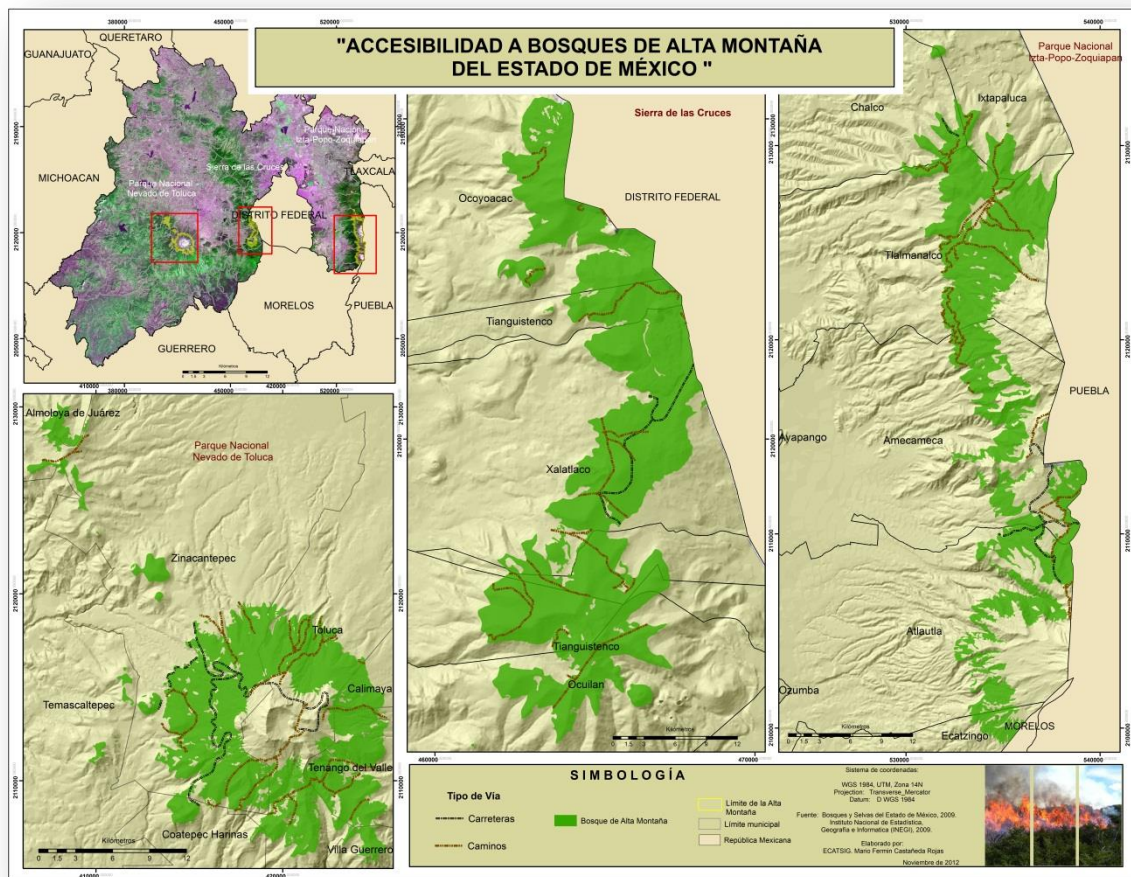


Figura 16. Accesibilidad al BAM del Estado de México

7.4.3 Perturbación Ambiental

La evaluación de este factor, se realizó en cada sitio de muestreo, identificando visualmente la evidencia de una o varias perturbaciones (Cuadro 7), y el porcentaje en el que se presentó. Cada perturbación fue valorada de manera independiente de 0 a 100% (Cuadro 8).

Cuadro 7. Perturbaciones ambientales

Clave	Tipo de perturbación
1	Ninguna
2	Daños por plagas (insectos descortezadores)
3	Daños por plantas parásitas (muérdago enano)
4	Daños por incendio forestal en arbolado
5	Daños por pastoreo
6	Daños causados por aprovechamiento en la vegetación

Modificado de Flores *et al*, (2008).

La categoría de otras actividades antrópicas, enmarca evidencias de cercado limítrofe entre predios, zanjas de infiltración o tinas ciegas, basura y fogatas de paseantes (Figura 17).



Figura 17. a) Fogatas de paseantes, b) Botellas de vidrio que generan el “efecto lupa”, c) Cercado limítrofe entre predios.

Cuadro 8. Grado de perturbación

Clave	Grado de perturbación	% Observado
1	No perceptible	No se detecta
2	Menor	0 – 25
3	Medio	25 - 50
4	Mayor	50 – 75
5	Máximo	75 - 100

Flores *et al*, (2008).

7.4.4 Inventario forestal

Para la evaluación de la estructura forestal del BAM se utilizó la clasificación de Valdez (2002) (Cuadro 9), la cual, con base en la medida del diámetro y altura se pueden diferenciar los individuos de acuerdo a su tamaño y edad (Endara, 2010).

Cuadro 9. Clasificación de la regeneración

Clase	Tamaño
Plántula	< 30 cm altura
Brinzal	≥ 0.3 < 1.5 m de altura
Latizal	≥ 1.5 m de altura < 2.5 cm DAP
Fustal	≥ 2.5 DAP

Valdez (2002).

7.4.4.1 Variables de medición para individuos ≥ 2.5 cm de DAP

7.4.4.1.1 Diámetro a la altura de pecho (DAP)

La medición se realizó a todos los fustales (≥ 2.5 cm de DAP) que se encontraron dentro de un área 1 000 m² a partir del centro del sitio, evaluando el DAP con cinta diamétrica a una altura de 1.3 metros sobre la base del tronco registrando el dato en el formulario de campo (Anexo 1).

7.4.4.1.2 Altura total y fuste limpio

La estimación se realizó con un clinómetro digital Haglof Ci. La altura total se determinó midiendo la distancia vertical entre la base y el ápice del árbol, mientras que para la altura del fuste limpio se midió la distancia vertical desde la base del suelo hasta la bifurcación principal misma que marca el inicio de la copa (Endara, 2010).

La estimación de estas alturas tiene base en la siguiente formula:

$$y = x (\tan \alpha)$$

Dónde:

X= Distancia entre la persona y la base del árbol

α= Ángulo medido en grados.

Para estas mediciones se tuvo el cuidado de que la base del árbol y los ojos del observador estuvieran a la misma altura, de tal manera que la distancia entre la base del tronco y el observador sea igual a la altura del árbol (Endara, 2010), evaluando también, la evidencia y grado de daño (Cuadro 10).

Cuadro 10. Daño y grado de daño en individuos ≥ 2.5 cm de DAP

Daño		Grado de Daño	
Clave	Descripción	Clave	Descripción
A	Fuego	A	Sin Daño
B	Tala	B	Bajo
C	Plaga	C	Medio
D	Nada	D	Alto

Modificado de Flores *et al*, (2008).

7.4.4.1.3 Diámetro de copa

Se estimó el diámetro de copa de cada árbol, utilizando una cinta métrica de 30 metros, partiendo de la base del tronco como punto central hacia la punta de la copa en dirección a los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, Este, Oeste), obteniendo así un diámetro mayor y un diámetro menor los cuales fueron promediados para la obtención del diámetro de copa final de cada individuo.

7.4.4.1.4 Tocones

Se contabilizaron y midieron los diámetros de todos los individuos con evidencia de corte en un área de 1000 m², con la finalidad de evaluar la distribución de tocones para las diferentes clases diamétricas en cada una de las condiciones de densidad del BAM.

7.4.4.2 Variables de medición para la regeneración

7.4.4.2.1 Diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura

Sobre tres superficies de 18 m², a las plántulas, brinzales y latizales se les midió la altura total a partir de la base del individuo hasta la cima del mismo (Figura 18) con ayuda de una cinta métrica de 2.5 metros de longitud. A los latizales se les midió el DAP a una distancia de 1.3 metros a partir de la base del individuo con ayuda de un vernier electrónico, registrando las medidas en el formato de campo (Anexo 2).



Figura 18. Medición y registro de altura de un brinzal, PNNT 2012.

7.4.4.3 Variables de medición para el sotobosque

7.4.4.3.1 Diámetro y altura

La estimación se realizó en tres superficies de 18 m² en los que se midieron los diámetros y las alturas de los arbustos y los pastos con ayuda de una cinta métrica de 2.5 metros de longitud (Figura 19).



Figura 19. a) Estimación de altura en pasto, b) Estimación de diámetro en arbusto y c) Estimación de altura en arbusto, PNNT.

7.4.5 Densidad del Bosque

Con base en la fotointerpretación realizada y los inventarios forestales, se validó cada una de las densidades (denso, semidenso y fragmentado) tomando en cuenta el número de individuos medidos por hectárea.

7.4.6 Inventario de combustible forestal

Para que los incendios forestales se generen, requieren de tres factores esenciales: el material combustible, las condiciones ambientales favorables y un factor de inicio (Santiago *et al.*, 1999). Para cuantificar al primer elemento, se adoptó la metodología de Flores *et al.* (2008) (Figura 20), la cual está basada en la propuesta de intersecciones planares (Brown, 1974; Brown *et al.*, 1982; Sánchez y Zerecero, 1983).

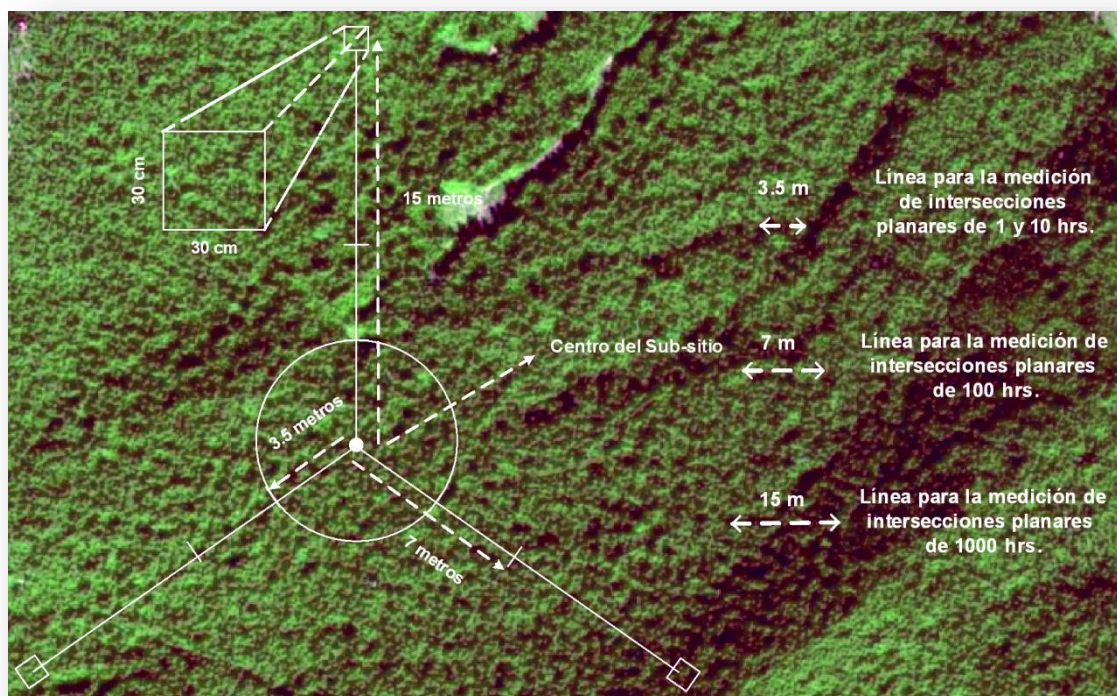


Figura 20. Diseño de muestreo de combustibles forestales mediante transectos. Flores *et al.* (2008).

7.4.6.1 Evaluación de combustibles forestales gruesos y finos

Se contabilizaron las intersecciones de combustibles gruesos (ramillas, ramas y troncos), bajo un transecto de 15 m seccionado a los 3.5 y 7 m según su diámetro y respectivo tiempo de retardo. El Cuadro 11, muestra ésta relación.

Cuadro 11. Relación del tiempo de retardo, diámetro de combustibles y distancia de medición.

Tiempo de retardo	Diámetro (cm)	Distancia de medición (m)
1 hora	0.0 a 0.6	0 - 3.5
10 horas	0.61 a 2.5	0 - 3.5
100 horas	2.51 a 7.5	0 - 7
1 000 horas	>7.5	0 - 15

Fuente: Modificado de Rodríguez *et al.*, (2002)

Una vez contabilizadas las intersecciones de los combustibles de 1, 10 y 100 horas, se registraron en los formatos de campo (Anexo 3). Para el caso de los combustibles de 1 000 horas, se midió el diámetro en el punto donde el tronco cruza con el transecto y se determinó su condición: firme o podrido.

Al final de cada transecto se estableció un recuadro de 30 x 30 cm que sirvió para la evaluación de acículas y pastos. Registrando su porcentaje de cobertura (0 a 100%) y profundidad (cm).

Una vez obtenidos los datos de cobertura y profundidad, las acículas se recolectaron en bolsas de plástico previamente etiquetadas, se llevaron a laboratorio en donde fueron separadas de materia orgánica y suelo. Se ingresaron a una estufa durante 24 hrs. a temperatura constante de 75 °C, para ser pesadas en seco (grs.) (McRae *et al.*, 1979; Morfín *et al.*, 2012) (Figura 23).



Figura 21. Proceso de secado y pesado de combustible forestal fino

7.4.6.2 *Calculo de carga de combustible Forestal*

Con base en datos de pendiente, el número de intersecciones de combustibles de 1, 10 y 100 horas, diámetro y condición de los combustibles de 1 000 horas y el peso en seco de las acículas, se calculó la carga de combustible, utilizando el Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales en Web (SICCO) (Chávez *et al.*, 2011) (Figura 22).

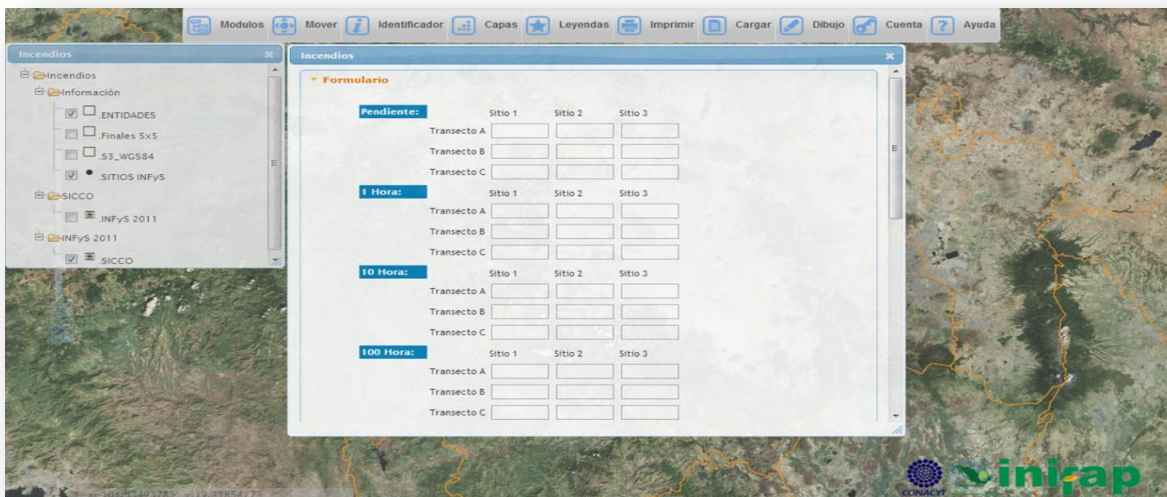


Figura 22. Interfaz del Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales en Web (SICCO).

El sistema tiene su base en las ecuaciones propuestas por Brown (1974), Brown y colaboradores (1982) (Anexo 4).

7.4.7 Análisis espacio-temporal de los incendios forestales (2006-2012).

A partir de los registros de ocurrencia de incendios en la zona de estudio, proporcionados por la Protectora de Bosques (PROBOSQUE), se realizó una depuración y estructuración de las bases de datos (BD), creando una base cartográfica que incluye, el número de incendios, la superficie y estrato afectado, así como las causas que originaron el siniestro durante el periodo 2006-2012 (Figura 23).

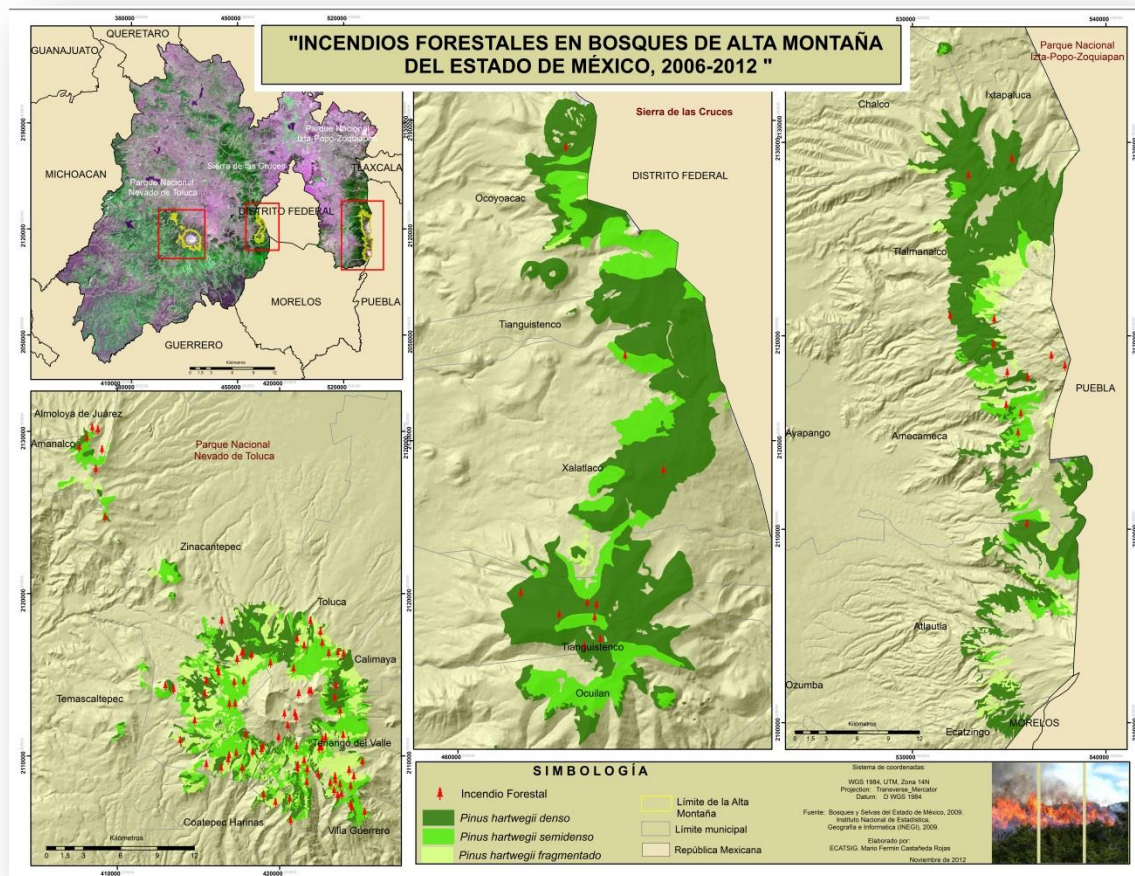


Figura 23. Incendios forestales en BAM del Estado de México, periodo 2006-2012.

7.4.7.1 Procesamiento de las Bases de Datos (BD)

Con apoyo en las BD estructuradas y depuradas, se evaluó el número de incendios, las superficies afectadas en los diferentes estratos de la vegetación (renuevo, arbolado, arbustos y pastos), las causas que originaron el fenómeno y los meses en los que se presentaron. Obteniendo de esta manera, la evolución de los incendios en la zona de estudio.

7.4.7.2 Indicador de frecuencia

Para la realización de este indicador se recurrió a los datos de ocurrencia por municipio en el BAM del Estado de México, en los cuales se calculó el número anual de incendios por cada 1 000 ha de superficie forestal > 3 500 msnm de cada municipio, para su posterior espacialización en el Software ArcGis 10. (Modificado de Martín *et al.*, 1998a).

7.4.7.3 Indicador de gravedad

Este indicador se obtiene, dividiendo la superficie anual afectada por incendios entre la superficie forestal > 3 500 msnm por municipio, expresado en términos porcentuales y ligados a una base cartográfica para su representación (Martín *et al.*, 1998a).

7.5 Análisis estadísticos

Con base en el número de individuos (plántulas, brinzales, latizales y fustales) y carga de combustible de cada una de las densidades de cobertura (denso, semidenso y fragmentado), se realizó con un análisis de varianza (ANOVA) mediante el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un nivel de significancia de 0.05 en el software SPSS Statistics v19.

Finalmente, mediante los datos de los 30 sitios de muestreo y los parámetros registrados en campo y laboratorio, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP); con la finalidad de reducir y simplificar dichos parámetros (Krzanowski, 1988).

8. RESULTADOS

Los resultados de este estudio se reportan en un artículo enviado a la revista *Investigaciones Geográficas, Boletín* del Instituto de Geografía. Se anexa copia del artículo y la carta de recepción de la revista.



Tel. 5623 0222
Ext. 45561
Fax. 5616 2145
edito@igg.unam.mx
www.igeograf.unam.mx
Circuito Exterior s/n,
Ciudad Universitaria,
CP 04510 México DF,
Apdo. Postal 20-850

Comité Editorial

Ciudad Universitaria, D. F., 23 de mayo de 2013

**Mario Fermín Castañeda Rojas,
Ángel Rolando Endara Agramont,
María de Lourdes Villers Ruiz y
Eufemio Gabino Nava Bernal
Presentes**

Por este conducto les informo con respecto al artículo: "**Factores que influyen en la vulnerabilidad a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México**", entregado para su posible publicación en *Investigaciones Geográficas, Boletín* del Instituto de Geografía, que actualmente se encuentra en proceso de dictamen.

Sin otro particular, se despide.

ATENTAMENTE

Dr. José Luis Palacio Prieto
Editor Académico

Investigaciones Geográficas, Boletín es una publicación incluida en: Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica de CONACyT, SciELO-México y en SCOPUS de Elsevier B. V.

Factores que influyen en la vulnerabilidad a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México

Mario Fermin Castañeda Rojas*

Angel Rolando Endara Agramont*

María de Lourdes Villers Ruíz**

Eufemio Gabino Nava Bernal*

Resumen

Se determinaron los factores físico-geográficos y antrópicos que influyen en la vulnerabilidad a incendios en bosques de alta montaña del Estado de México, mediante inventarios forestales y de combustibles, evaluación de intervenciones antrópicas y fitosanitarias, así como un análisis histórico de la ocurrencia de estos siniestros, en tres densidades de cobertura aplicando un análisis de componentes principales (ACP). Los resultados demuestran, que el número de individuos en el bosque denso es de 387 ha⁻¹, en semidenso 347 ha⁻¹ y en fragmentado 261 ha⁻¹ y la cantidad de combustible muerto es de 25.13 t/ha⁻¹, 23.95 t/ha⁻¹ y 33.81 t/ha⁻¹ respectivamente, evidenciando la reducción de individuos y la generación de material combustible a causa la intervención antrópica. Se identificó que en el 2008 se presentaron mayor número de siniestros afectando 173 ha⁻¹; sin embargo, en el 2011 a pesar de que no fue el año con mayor número de eventos, si fue el más devastador, afectando cerca de 547 ha⁻¹. El ACP indica que las actividades forestales y pecuarias están relacionadas con la cantidad de carga de combustible y con la presencia de incendios históricos que en su conjunto son los parámetros de primer orden que afectan a esta zona de estudio.

Palabras clave

Factores físico-geográficos y antrópicos, vulnerabilidad, incendios forestales, bosque de alta montaña.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno ampliamente extendido en los ecosistemas terrestres del mundo. Todos los años grandes extensiones de bosques, selvas, matorrales y pastizales se incendian (Schultz *et al.*, 2008) y el fuego puede ser claramente determinante en la dinámica de los ecosistemas dependientes del mismo (Rodríguez, 1996; Villers, 2006; McKenzie *et al.*, 2011).

*Instituto en Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. 50295 Estado de México. E-mail: castaneda.mariof@gmail.com; arendaraa@uaemex.mx; gnavab@uaemex.mx.

**Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Autónoma de México. 50295 México, D.F. E-mail: villers@atmosfera.unam.mx.

En México el 97 % de los incendios forestales son provocados por el hombre y el 54 % de éstos se deben a las actividades agropecuarias. Su extensión e intensidad dependen de las condiciones ambientales, topografía, la cantidad, calidad y el tipo de combustibles disponibles en el sitio (Sosa *et al.*, 1999). En el año 2011, se registraron 12,113 incendios en 32 entidades federativas, afectando una superficie de 956,404.80 hectáreas, cifra superior a la registrada en 1998 con un total de 849,632 hectáreas. (CONAFOR, 2006; 2011).

Los Bosques de Alta Montaña (BAM) del Estado de México, desarrollados sobre los 3 500 msnm y representados por el *Pinus hartwegii* son objeto de diversos impactos tales como: el cambio de uso de suelo, los incendios, fragmentación y deforestación de sus bosques, producto principalmente, de la gran carga demográfica alrededor de éstos (Madrigal, 1992).

En general los pinos presentan ciertas adaptaciones al fuego, en teoría la ocurrencia promedio de incendios naturales en estos bosques es cada cinco años (Rodríguez, 2001). Sin embargo los incendios ocasionados por el hombre superan a los naturales (Rodríguez y Fulé, 2003) y esto puede implicar la continua disminución de ésta única especie adaptada a las alturas ya que marca el límite altitudinal arbóreo en México (Rodríguez, 2001).

El 35% de los incendios en los BAM del Estado de México, son producto de las actividades agropecuarias, mientras que el 20 y 18% corresponden a las fogatas de paseantes y actividades forestales respectivamente (PROBOSQUE, 2012).

Por lo tanto estos ecosistemas presentan cierta vulnerabilidad condicionada por factores físico-geográficos (Castañeda, 2011) (altitud, exposición de ladera, pendiente del terreno y densidad de vegetación) y antrópicos (actividades forestales y pastoreo), tal y como menciona Hardy (2005), la vulnerabilidad a incendios forestales, es la susceptibilidad o predisposición intrínseca de algún ecosistema a ser afectado seriamente por el fuego. Además del factor interno de riesgo, esta situación depende en gran medida de la actividad humana presente (Show y Clarke, 1953; Villers y López, 2004).

La acumulación de combustible forestal ya sea de manera natural ó favorecido por la actividad humana, es otro factor que hacen de los bosques vulnerables a incendios. Los combustibles forestales incluyen desde troncos de árboles muertos en pie o caídos, residuos leñosos, hojas y materia orgánica del suelo hasta biomasa de plantas vivas y sus partes que cuando están lo suficientemente secos los hacen disponibles para la combustión (Chandler *et al.*, 1983; Flores y Benavides, 1994; Rodríguez, 1994; 1996; Pyne *et al.*, 1996; CENAPRED, 2001; Arnaldos-Vigers *et al.*, 2004; Morfín, 2012).

Otro factor estrechamente relacionado con la presencia del fuego en general es la presencia de plantas parásitas (*Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens subsp. *Grandicaule* y *Arceuthobium vaginatum* (Willd) Presl. subsp. *vaginatum*) y las plagas forestales (*Dendroctonus adjunctus* Blandford Coleoptera: Scolytidae) presentes en este tipo de ecosistemas (Miller y Patterson, 1927; Furniss, 1965; Cibrián *et al.*, 1995; Suckling *et al.*, 2001 y Sullivan *et al.*, 2003).

Las evaluaciones sobre la ocurrencia y variaciones históricas de los incendios suman importancia en el contexto de vulnerabilidad de los recursos forestales (Badía, 1998;

Miranda, 2004 y Ávila *et al.*, 2010) ya que se pueden definir patrones de distribución espacial sobre grandes áreas geográficas (Moreno, 1989; Chuvieco, 1998; Yang *et al.*, 2007), o bien variaciones temporales de ocurrencia histórica (Drury y Veblen, 2008; Kellogg *et al.*, 2008).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue analizar los factores físico-geográficos y antrópicos que influyen en la vulnerabilidad a incendios forestales en BAM del Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODO

El bosque de alta montaña (BAM) del Estado de México se presenta en tres zonas: Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), Sierra de las Cruces (SC) y Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan (PNIZ-Pp-Z), definiéndose en un gradiente altitudinal que va de los 3 500 a los 4 200 msnm.

El área se localiza entre los 18°59'01'' y 19°18'50'' latitud norte y los 98°37'30'' y los 99°53'45'' longitud oeste, con un clima semifrío, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 5 y 12 °C, con precipitaciones medias anuales de 967 a 1 200 mm, con un régimen de lluvias en verano y con menos de 5 % de la precipitación en invierno (Mendoza, 1977; García, 1981 y Benítez, 1988). La vegetación del BAM está representada por *Pinus hartwegii*, la cual ocupa una superficie de 23 686 ha.

Fotointerpretación de densidades de cobertura y selección de sitios de muestreo

Se realizó una fotointerpretación de imágenes de satélite fusionadas provenientes del sensor Spot 5, entre imágenes multispectrales (resolución espacial de 10 metros) y pancromáticas (resolución espacial de 2.5 metros) de la misma zona, dentro del software PCI Geomatics.

En el software ArcGIS 10, se digitalizaron tres diferentes densidades de cobertura del BAM, se consideró bosque denso a aquella superficie que presenta entre 80 a 100 % de cobertura de copa, bosque semidenso 50 a 79 % y bosque fragmentado < 50 % (Regíl, 2005).

Los criterios para la selección de los sitios donde se aplicaron los inventarios forestales, perturbación antrópica y de combustibles fueron los siguientes: a) 10 sitios de muestreo en bosque de *Pinus hartwegii* denso, 10 en semidenso y 10 en fragmentado (Figura1), b) Evidencia o reporte de incendio forestal durante el periodo 2006-2012, c) Gradiente altitudinal de 3 500 a 3 900 msnm y d) Accesibilidad al sitio. Se ubicaron coordenadas de posibles sitios de muestreo para el trabajo en campo y se identificó su accesibilidad.

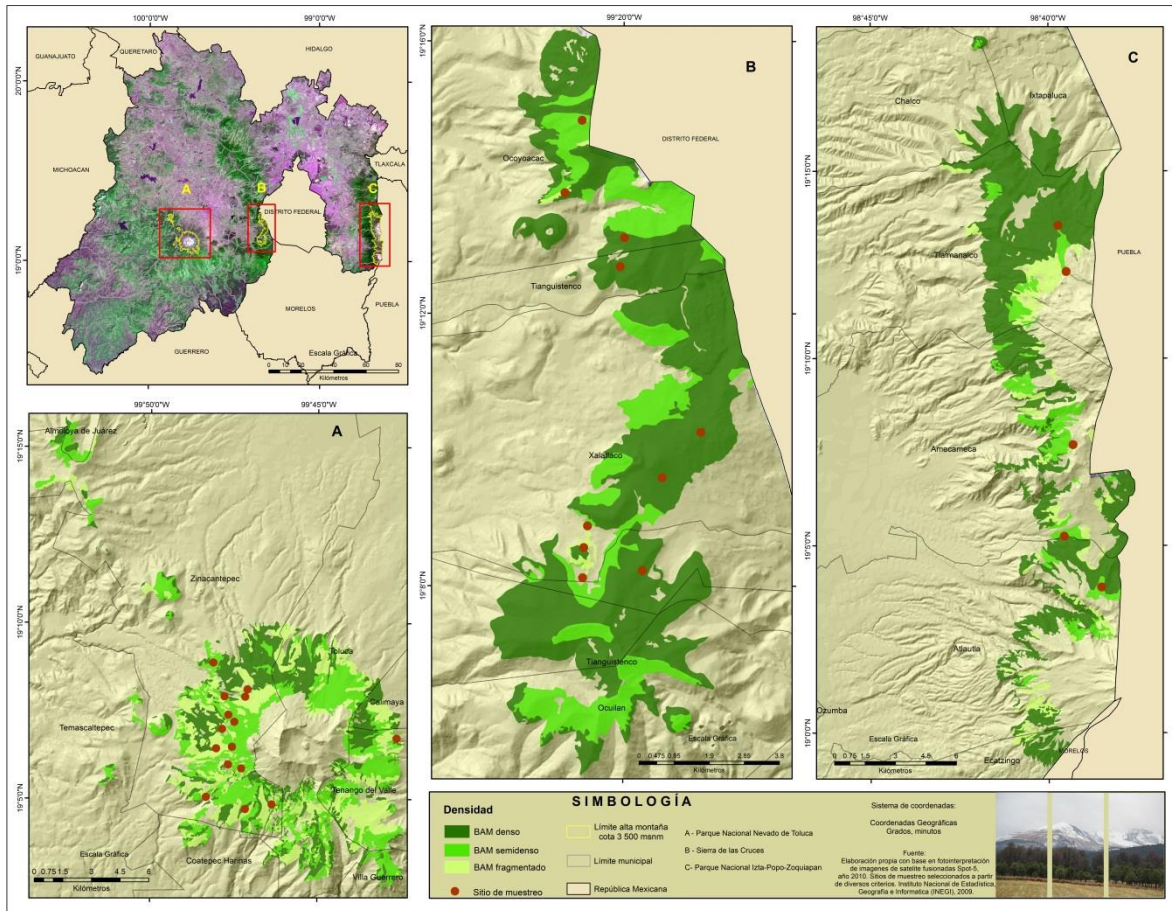


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de sitios de muestreo por densidad de cobertura.

Trabajo de campo

En campo se ubicaron los sitios propuestos en gabinete con ayuda de un GPSMAP® 60CS (error de ± 3 m.), una brújula-clinómetro TANDEM SUUNTO, estacas de madera de un metro de alto y cuerdas de diferentes longitudes, se procedió a delimitar e instalar cada uno de los sitios de muestreo. Cada sitio circular constó de $1\ 000\text{ m}^2$ orientado al norte franco, y en su interior tres sub-sitios de 3.5 metros de radio cada uno, a una distancia de 8.9 metros y en ángulos de azimut 0° , 120° y 240° a partir del centro del sitio (Flores *et al.*, 2008). En el área del círculo mayor se inventariaron todos los fustales (>2.5 cm de DAP) y en los tres sub-sitios se midieron plántulas (< 30 cm de altura), brinzales (≥ 30 cm ≤ 1.5 m de altura) y latizales (≥ 1.5 m de altura < 2.5 cm de DAP) (Valdez, 2002 y Endara, 2010), así como el sotobosque, constituido por arbustos y pastos (Figura 2).

Cada sub-sitio está conformado por tres transectos de 15 metros, distribuidos en ángulos de 0° , 120° y 240° de azimut, que sirvieron para la evaluación del combustible muerto; finalmente en el extremo de cada transecto se instaló un cuadrante de 30×30 cm en el cual se evaluó el combustible forestal fino (hojarasca).

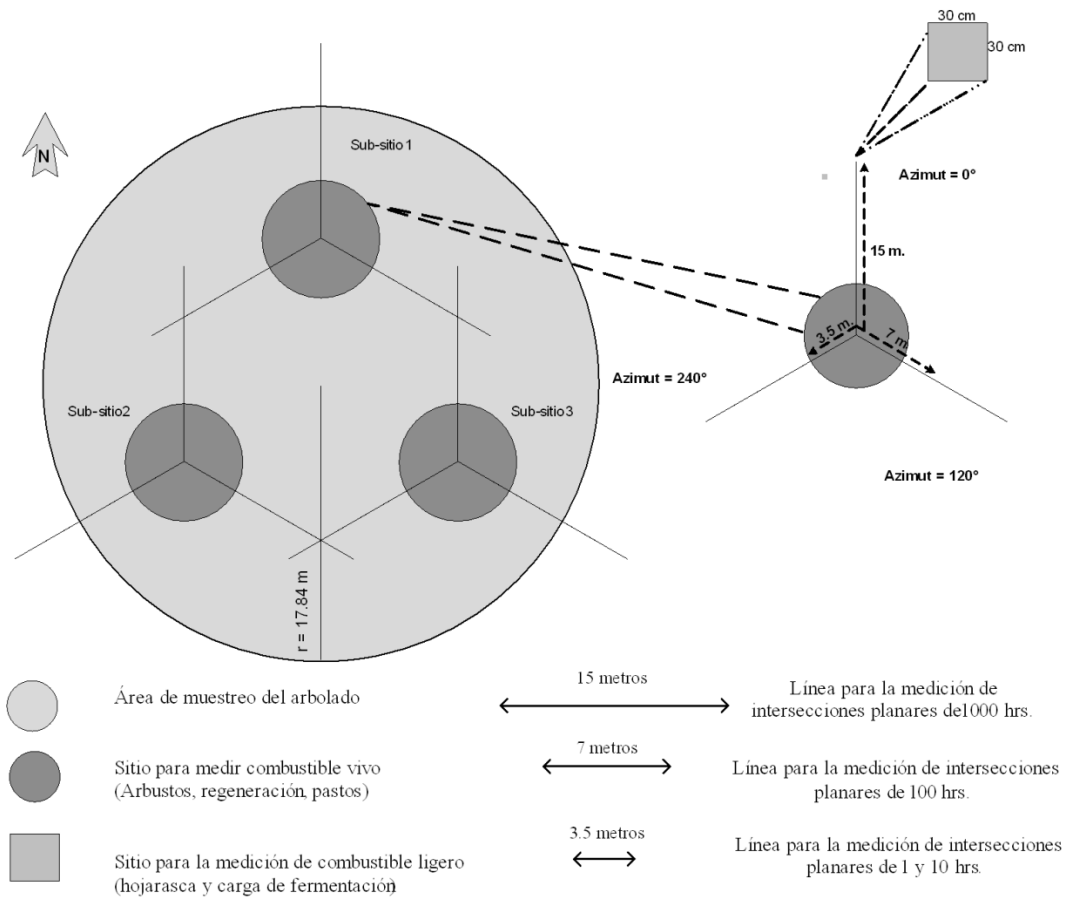


Figura 2. Diseño del sitio de muestro, modificado de Flores *et al*, (2008).

Inventario forestal y de combustibles (vivos y muertos)

Para la evaluación de la estructura forestal se utilizó la clasificación de Valdez (2002) y Endara *et al*, (2012), donde se agrupan a los individuos con base a su diámetro y altura. De éste modo se realizó la medición a todos los fustales que se encontraron en el sitio de muestreo (1 000 m²), midiendo el diámetro a la altura del pecho (DAP) con cinta diamétrica a 1.3 metros sobre la base del tronco, la estimación de la altura total, fuste limpio y comercial se realizó con un clinómetro digital Haglof Ci.

La altura total se determinó midiendo la distancia vertical entre la base y el ápice del árbol, mientras que para la altura del fuste limpio se midió la distancia vertical desde la base hasta la bifurcación principal, misma que marca el inicio de la copa (Endara, 2010) y para la altura comercial se midió la distancia vertical desde la base hasta la evidencia de deformación en el tronco o hasta la altura donde el fuste tiene valor comercial.

Por otro lado, se contabilizaron y midieron los diámetros de todos los tocones en un área de 1 000 m², con la finalidad de evaluar la distribución de estos individuos para las diferentes clases diamétricas y evidenciar la extracción del recurso forestal en cada una de las densidades del BAM.

Sobre los tres sub-sitios antes señalados (18 m² cada uno) se midieron las alturas totales de plántulas, brinzales y latizales con ayuda de una cinta métrica de 2.5 metros de longitud, además de ello a los latizales se les midió el DAP con una cinta diamétrica. Para el caso del sotobosque, se midieron los diámetros y las alturas promedio de arbustos y pastos, utilizando una cinta métrica de 2.5 metros de longitud.

Para la evaluación del combustible forestal superficial, se adoptó la metodología de Flores *et al*, (2011) (Figura 2), que está basada en la técnica de intersecciones planares de Brown (1974); Brown *et al*, (1982) y modificada por Sánchez y Zerecero (1983), en la cual se contabilizaron los combustibles gruesos por tiempo de retardo (Villers, 2006), encontrando combustibles de 1, 10, 100 y 1000 horas, cuyos diámetros varían de 0 a 0.6, 0.61 a 2.5, 2.51 a 7.5 y mayores a 7.5 cm respectivamente (Villers, 2006; Flores *et al.*, 2008).

Para el caso de los combustibles de 1 000 horas, se midió el diámetro en el punto donde el tronco intersecta el plano horizontal (transecto) y se determinó si éste combustible está “firme” o “podrido”. Al final de cada transecto se estableció un recuadro de 30 x 30 cm., que sirvió para la evaluación de la hojarasca, registrándose el porcentaje de cobertura y su profundidad.

Éste material se recolectó y se llevó a laboratorio en donde se realizó una separación de acículas. Posteriormente éstas fueron ingresadas a una estufa para su secado, permaneciendo 24 hrs. a una temperatura de 75 °C, para obtener el peso en seco en gramos del combustible fino.

Se calculó la cantidad de carga de combustible con base en la pendiente del sitio, en el número de intersecciones, el diámetro y condición y el peso en seco de la hojarasca, utilizando el Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales en el servidor Web (SICCO) (Chávez *et al.*, 2011), en el que se obtuvo el peso total y por tiempo de retardo, expresado en t/ha⁻¹.

Evaluación de factores antrópicos y fitosanitario del bosque

En cada sitio de muestreo se identificó visualmente la evidencia y grado de deterioro del bosque de manera independiente para cada tipo (Cuadro 1), medido en porcentaje de 0 a 100 y categorizado según el Cuadro 2.

Cuadro 1. Tipo de deterioro.

Clave	Tipo de deterioro
1	Ninguna
2	Daños por plagas (insectos descortezadores)
3	Daños por plantas parásitas (muérdago enano)
4	Daños por incendio forestal en arbolado
5	Daños por pastoreo
6	Daños causados por actividades forestales
7	Otras intervenciones antrópicas

Modificado de Flores *et al*, (2008).

La categoría de otras intervenciones antrópicas enmarca evidencias de cercado limítrofe entre predios, zanjas de infiltración o tinajas ciegas, brechas corta fuego y fogatas de paseantes.

Cuadro 2. Grado de deterioro.

Clas e	Grado de deterioro	% Observado
1	No perceptible	No se detecta
2	Menor	0 – 25
3	Medio	25 - 50
4	Mayor	50 – 75
5	Máximo	75 - 100

Modificado de Flores *et al*, (2008).

Análisis de datos

Con los datos recabados de los inventarios forestales y de combustibles, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA simple), mediante el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, con un nivel de significancia de 0.05 en el software SPSS Statistics v19.

Con base en los registros de ocurrencia de incendios forestales en el Estado de México, proporcionados por el departamento de Incendios Forestales de la Protectora de Bosques (PROBOSQUE), se creó una base cartográfica del área del estudio, que incluye el número de incendios, las superficies afectadas en los diferentes estratos de la vegetación (renuevo, arbolado, arbustos y pastos), las causas y los meses en los que se presentaron éstos siniestros durante el periodo 2006-2012.

Indicadores de frecuencia y gravedad

Para la realización del indicador de frecuencia se recurrió a los datos de incidencia por municipio, de los cuales se calculó el número anual de incendios forestales por cada 1 000 has de superficie forestal (Modificado de Martín *et al.*, 1998) para su posterior espacialización en el Software ArcGis 10.

En tanto que, el indicador de gravedad, es el resultado de dividir la superficie anual afectada por incendios forestales entre la superficie forestal por municipio, expresado en términos porcentuales. (Martín *et al.*, 1998).

Análisis de componentes principales

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) en el software SPSS Statistics v19, con base en los 30 sitios de muestro y los parámetros registrados en campo y laboratorio. Para la altitud, pendiente del terreno, exposición de ladera y carga de combustible, no fue aplicada una categorización; para el caso de los tipos de deterioro se clasificaron por clase, según se señala en el Cuadro 2.

Lo anterior, con la finalidad de reducir y simplificar los parámetros, aplicando un análisis de componentes principales a éstos y que expliquen la variabilidad entre sitios (Krzanowski, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fotointerpretación de densidades de cobertura

Las tres zonas fotointerpretadas PNNT, SC y PNlz-Pp-Z, no son iguales en cuanto a superficie forestal total, ya que presentan $9\ 783\ \text{ha}^{-1}$, $5\ 390\ \text{ha}^{-1}$ y $8\ 512\ \text{ha}^{-1}$ respectivamente. En el PNlz-Pp-Z el 74% de su cobertura forestal corresponde al bosque denso, en SC el 72% y en el PNNT, tan solo el 29%.

Lo anterior, evidencia la perturbación antrópica que tienen los bosques del PNNT, especialmente el semidenso ($3\ 886\ \text{ha}^{-1}$) y fragmentado ($3\ 063\ \text{ha}^{-1}$), donde se practica del pastoreo, saneamientos, aclareos y extracción forestal.

Caracterización forestal de los sitios

En los sitios de muestreo se encontró predominancia hacia las exposiciones Sur, Sur-Este y Sur-Oeste, con pendientes del terreno desde 2° a 25° .

En términos de estructura de la vegetación, se determinaron por ANOVA tres estratos (dominante o superior, co-dominante o intermedio y oprimido o inferior) con diferencias significativas ($p < 0.05$) para cada una de las densidades de cobertura. Los individuos más altos se ubican en bosques semidensos entre 23 y 24 m de altura y con relación al área basal, están entre los 75 y 80 cm de DAP. El estrato dominante en esta densidad comienza a los 17 m. y comprende a individuos desde 40 cm de DAP.

El estrato dominante del bosque denso se encuentra a partir de los 11 m (DAP 25cm) y en el fragmentado desde 15 m (DAP 30cm). Estos resultados sugieren que, en el bosque denso los individuos alcanzan el estrato dominante en las primeras clases diamétricas, ya que según señalan Austin (1990) y Granados *et al*, (2007) la competencia por espacio y luz a la que están sometidos, acelera el crecimiento en altura de las clases juveniles.

El número de individuos en el bosque denso es de $387\ \text{ha}^{-1}$, en semidenso $347\ \text{ha}^{-1}$ y en fragmentado $261\ \text{ha}^{-1}$, mostrando diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), entre las categorías diamétricas 5, 25, 30, 50, 55, 60 y 70.

En relación a la abundancia de regeneración, el bosque fragmentado muestra diferencias con respecto al denso y semidenso, ya que cuenta con mayor número de brinzales ($65\ \text{ha}^{-1}$), pero también una mayor mortandad de latizales, posiblemente por la presencia incendios forestales inducidos, la tala inmoderada y el pastoreo a la que estos ecosistemas están sujetos (Endara, 2010).

Bajo estas condiciones a mediano plazo, no garantizan que las plántulas, brinzales y latizales alcancen un DAP de 2.6 a 12.5 cm.

Inventario de combustibles (vivos y muertos)

En los ecosistemas de alta montaña, el estrato herbáceo está representado por las asociaciones de zacatón (*Lupinomontani-calamagrostion toluensis*) (Almeida *et al.*, 2004). Para las tres densidades, la cobertura de pastos supera 5 000 m²/ha⁻¹ y las alturas oscilan entre 25 y 50 cm (Cuadro 3), éste elemento influye en la propagación superficial del fuego (Morfin *et al.*, 2012), aunado a la presencia de arbustos en bosques densos y fragmentados, pero no en semidensos.

Cuadro 3. Dimensiones del pastizal alpino y arbustos

Densidad	Pastizal			Arbusto		
	Cobertura	Altura	Diámetro	Cobertura	Altura	Diámetro
	m ² /ha ⁻¹	cm.	cm.	m ² /ha ⁻¹	cm.	cm.
Denso	5 200	33	20	450	69	80
Semidenso	6 100	50	30	*j	*j	*j
Fragmentado	5 100	25	19	600	69	50

Los resultados son valores promedio

**Inexistente

El estudio del sotobosque en BAM es de suma importancia para evaluar el posible comportamiento vertical que tiene el fuego (Porrero, 2001), generando el llamado “efecto escalera” que podría afectar la copa de los árboles, ya que la altura del fuste limpio en las tres condiciones de bosque, oscila entre los 95 cm hasta el 1.50 metros en el estrato oprimido (clase diamétrica 5 y 10).

En relación al total de carga de combustible muerto, el bosque denso presentó 25.13 t/ha⁻¹, el semidenso 23.95 t/ha⁻¹ y el fragmentado 33.81 t/ha⁻¹ (Cuadro 4). Una vez realizado el ANOVA, éste muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tres tipos de densidades ($p > 0.05$). Estos datos demuestran que las tres densidades de bosque son intervenidos por el hombre, según Rothermel (1983) señala, que el combustible que va 25 a 30 ton/ha⁻¹ corresponde a un bosque aclareado o fuertemente aclareado con restos de poda.

Cuadro 4. Cantidad de carga de combustible por tiempo de retardo en tres condiciones de BAM

Cobertura	1 hr	10 hrs	100 hrs	1000 hrs Firmes	1000 hrs Podridos	Hojarasca	Total
Denso	0.30	3.82	1.96	13.22	4.96	0.87	25.13
Semidenso	0.16	4.48	2.09	6.89	9.43	0.91	23.95
Fragmentado	0.21	5.18	4.90	15.02	7.88	0.83	33.81

Los resultados se expresan en unidades de t/ha⁻¹

Los combustibles por tiempo de retardo y hojarasca, tienen un comportamiento diferente con los resultados totales, debido a las diferencias significativas ($p < 0.05$) que presentaron

los combustibles de 1 hora entre la condición denso y semidenso, esto sugiere que la densidad de vegetación arbórea es determinante en la acumulación de este tipo de material; por otro lado, existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los combustibles de 100 horas en el bosque fragmentado con respecto al denso y semidenso, debido probablemente a las actividades de saneamientos, aclareos y podas laterales.

Evaluación de factores antrópicos y fitosanitario del bosque

Los BAM en las tres condiciones están siendo perturbados por el hombre mediante diversas actividades, unas con mayor intensidad y frecuencia que otras. En todos los sitios muestreados, se registraron evidencias de pastoreo, 60% bosque denso, 20% en semidensos y 90% en bosques fragmentados.

En la mitad de los sitios de los bosques semidensos y fragmentados se detectó la presencia cercado limítrofe entre predios, zanjas de infiltración o también llamadas tinajas ciegas utilizadas como método de retención de agua (acción preventiva para evitar incendios forestales y erosión), evidencia de fogatas y actividades de extracción del recursos forestal no maderable (hongos comestibles).

Las actividades fitosanitarias (saneamientos y podas laterales), se presentaron en un 80% en bosque denso, 30% en el semidenso y 50% en el fragmentado.

En base al número individuos para cada clase y el número de tocones inventariados se estimó el porcentaje de extracción siendo el 13.2% para el denso y el 29.2 para el bosque fragmentado. Los diámetros de los arboles extraídos fluctúan entre 17 y 42 cm, Endara (2010) señala que esta extracción se utiliza para madera con fines comerciales.

La extracción de árboles en los bosques de pino, explica en parte la reducción de densidad del arbolado (Franco *et al.*, 2006; Endara, 2007). Los efectos de la extracción forestal contribuyen a la dinámica de los incendios forestales.

Análisis espacio-temporal de los incendios

Con base en los datos históricos de incendios y con la finalidad de conocer las áreas y los años de mayor número de siniestros en los BAM, se identificó que el año 2008 fue el que presentó mayor número de registros, afectando un total de 173 ha⁻¹ (Cuadro 5); sin embargo, en el 2011 a pesar de que no fue el año con mayor número de eventos, si fue el más devastador, afectando cerca de 547 ha⁻¹. El número de incendios por municipio y sus causas se muestran en la Figura 3.

Cuadro 5. Número de incendios y estrato afectado

Año	No. Incendios	Superficie afectada ha ⁻¹				
		Renuevo	Arbolado	Arbusto	Pasto	Total
2006	13	5.00	0.00	22.50	7.50	35.00
2007	5	1.50	0.00	8.50	4.00	14.00
2008	29	18.00	0.00	93.50	61.50	173.00
2009	20	10.00	0.00	45.50	15.00	70.50

2010	14	11.00	0.00	54.50	11.00	76.50
2011	18	3.40	2.00	373.90	167.20	546.50
2012	15	9.00	0.00	11.50	9.30	29.80
Total	114	57.90	2.00	609.90	275.50	945.30

Estadísticas de Incendios Forestales, PROBOSQUE, 2012.

Los resultados señalan que las actividades agropecuarias son la principal causa de los incendios (35%) y las actividades forestales (18%) afectaron una superficie de 432 ha⁻¹.

En términos generales los estratos mayormente afectados fueron los arbustos con el 65% del total seguido por los pastos con el 30%, vegetación que se recupera rápidamente después de la temporada de lluvias, mientras que las áreas con arbolado y renuevo solo fueron afectadas en un 5% (PROBOSQUE, 2012).

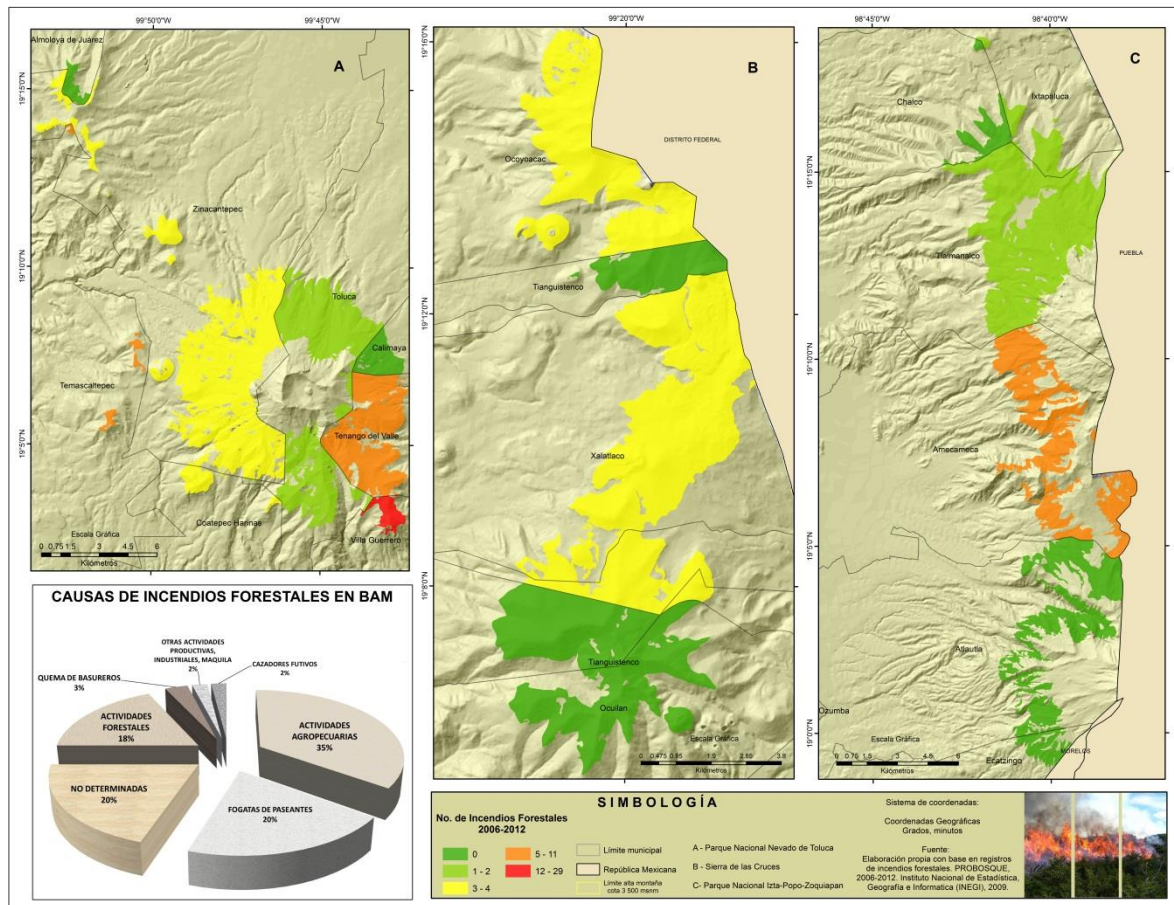


Figura 3. Incidencia y causas de incendios en BAM.

El número de incendios y su afectación se incrementa conforme se va elevando la temperatura ambiental, lo que acentúa de manera importante el porcentaje de eventos durante los meses de marzo (30%), abril (32%) y mayo (20%), periodo que coincide con la

época de sequía en la mayor parte del país y durante la cual los productores agropecuarios llevan a cabo sus trabajos de preparación y limpia de sus terrenos agrícolas y ganaderos con el uso del fuego (CONAFOR, 2006).

Indicadores de frecuencia y gravedad en BAM

En términos de frecuencia y tomando en cuenta los registros de incendios en BAM, en las zonas altas del municipio de Villa Guerrero (PNNT), presentó un índice muy alto (Figura 4), debido a que en tan solo 195 ha^{-1} existieron 29 incendios. Igualmente éste municipio, presentó un alto índice de gravedad ya que el 42% de su superficie forestal se siniestro.

Los municipios de Coatepec Harinas y Temascaltepec resultaron dañados en un 10 y 7% respectivamente con un grado alto de gravedad y finalmente los municipios de Tenango del Valle y Amecameca con un 3 y 2% de afectación, ubicándose en un rango medio.

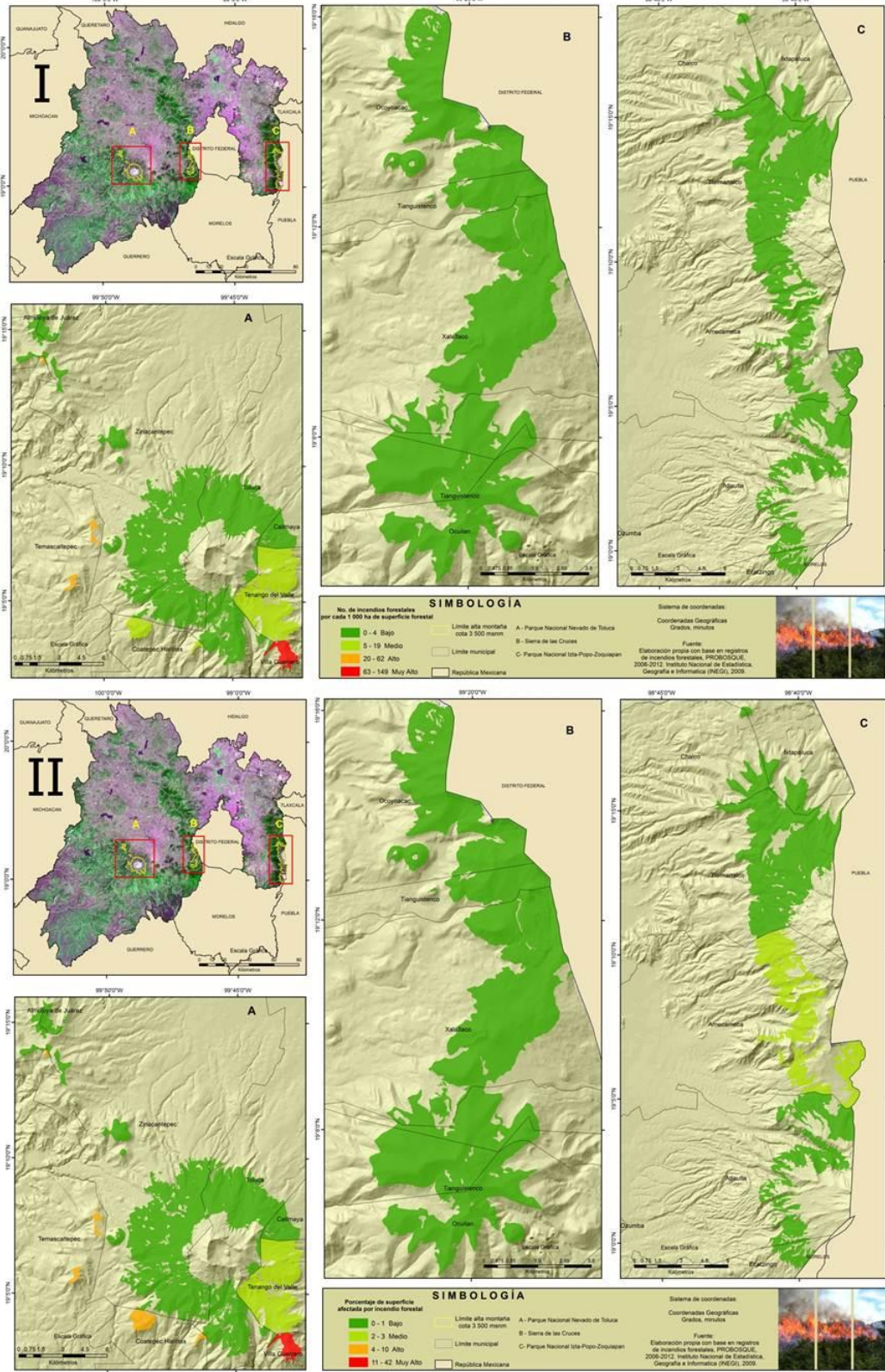


Figura 4. I) Indicador de frecuencia e II) Indicador de Gravedad en BAM del Estado de México

Análisis de componentes principales (ACP)

Del total de parámetros evaluados en campo y en laboratorio (12), para este estudio se tomaron en cuenta 8: altitud, intervención antrópicas, actividades forestales, carga de combustible, historial de incendios forestales, pastoreo, plagas y plantas parásitas, debido a que éstas fueron las que mostraron mayor representatividad en el estudio.

Cuadro 6. Resultados del ACP para los cuatro primeros componentes

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	2.212	27.653	27.653	2.212	27.653	27.653	2.126	26.572	26.572
2	1.569	19.619	47.272	1.569	19.619	47.272	1.397	17.459	44.031
3	1.276	15.951	63.223	1.276	15.951	63.223	1.375	17.182	61.213
4	1.021	12.765	75.988	1.021	12.765	75.988	1.182	14.775	75.988
5	.765	9.559	85.547						
6	.452	5.649	91.195						
7	.427	5.338	96.534						
8	.277	3.466	100.000						

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

En el cuadro 6 se exponen los resultados del ACP para los 4 primeros componentes. El componente 1 representa el 26.5% de varianza, el acumulado con el componente 2, suma el 44%, con el componente 3, el 61.2% y finalmente la suma de varianzas acumuladas con el componente 4 se explica el 75.9% con un nivel de significancia ($p < 0.05$).

Cuadro 7. Matriz de componentes rotados(a)

Parámetros	Componente			
	1	2	3	4
Plagas	.004	.011	.916	-.002
Historial de incendio forestal	.600	.066	.249	-.291
Pastoreo	.738	-.064	.402	.185
Actividades forestales	.808	-.146	-.279	-.070
Intervención antrópica	-.052	.040	.054	.910
Carga de combustible	.624	.293	-.289	.458
Altitud	-.376	.753	-.324	-.064
Plantas parásitas	.183	.844	.207	.123

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

De los ocho parámetros analizados, los cuatro que mayor peso tuvieron para la conformación del componente 1 fueron las **actividades forestales**, el pastoreo, la cantidad de carga de combustible y la presencia incendios forestales en el pasado. Esto indica, que las actividades forestales y pecuarias están a su vez relacionadas con la cantidad de carga de combustible y con la presencia de incendios históricos que en su conjunto son los parámetros de primer orden que afectan a esta zona de estudio.

En los bosques fragmentados de forma general se presentaron mayormente éstos parámetros, en comparación con el denso y semidenso (Cuadro 8).

Cuadro 8. Presencia de parámetros por densidad de cobertura

Parámetro	Denso	Semidenso	Fragmentado
Actividades forestales	41	25	34
Pastoreo	33	19	48
Carga de combustible	30	29	41
Historia de incendio forestal	30	35	35

Los resultados están expresados en términos porcentuales (%)

El componente 2 muestra una correlación entre la presencia de muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens subsp. *Grandicaule* y *Arceuthobium vaginatum* (Willd) Presl. subsp. *vaginatum*) y la altitud (Cedillo, 2012). En tercer y cuarto lugar se agregan en el ACP, la presencia del insecto descortezador (*Dendroctonus adjunctus* Blandford Coleoptera: Scolytidae) y las intervenciones antrópicas como pueden ser la presencia de cercas y evidencia de fogatas.

CONCLUSIONES

La fotointerpretación de imágenes de satélite Spot, permitió identificar la cobertura del BAM en tres densidades diferentes (denso, semidenso y fragmentado), evidenciando la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica y técnicas de percepción remota para el estudio espacial de los incendios forestales, debido a la capacidad de integración de información de diferente naturaleza y origen. Sin embargo, el levantamiento de datos en campo es fundamental para comprender la dinámica del siniestro.

Rodríguez (1996) y Juárez (2002) mencionan que conforme más joven sea un árbol y más delgada sea su corteza, mayor será la probabilidad de que resulte afectado por el fuego; ante esta situación, el bosque semidenso presenta la mayor abundancia de plántulas, brinzales, latizales y fustales en sus dos primeras etapas de crecimiento (de 2.6 a 12.5 cm de DAP) ascendiendo a 266/ha⁻¹, en comparación con el bosque denso 208/ha⁻¹ y fragmentado 172/ha⁻¹. Por tanto, el bosque semidenso ante este criterio, resulta ser más vulnerable a un incendio superficial donde se consume por completo el combustible y cause daños severos a la vegetación.

Sin embargo, el bosque denso con base en la altura del fuste limpio, alcanza una altura promedio de 95 cm desde la base del árbol, convirtiéndose esta zona susceptible a pasar de un incendio superficial a uno de copa, contemplando que la altura promedio de las llamas es de 1.5 metros.

Si bien es cierto que la cantidad de carga de combustible de un determinado sitio forestal depende del tipo de la vegetación presente (Wong, 2011) y de la densidad de ésta, las actividades forestales y pecuarias son fundamentales para la generación de material combustible muerto sobre el suelo.

De esta manera se identificó una mayor correlación entre los bosques fragmentados (50%) con la presencia del insecto descortezador (*Dendroctonus adjunctus* Blandford Coleoptera: Scolytidae) y muérdago enano (*Arceuthobium globosum* Hawksw. & Wiens subsp. *Grandicaule* y *Arceuthobium vaginatum* (Willd) Presl. subsp. *vaginatum*) y por

tanto, actividades de saneamiento, que implican la acumulación de combustible, pero no la extracción ni remoción del mismo.

Bajo este esquema, Zapata (1991) puntualiza que en la mayoría de los casos, la acumulación de combustibles en sitios donde se desarrollen actividades forestales (extracción forestal), será mucho más susceptible a ser afectado por el fuego, ya que pueden alcanzar valores de 36 t/ha^{-1} , caso que concuerda con los valores obtenidos en el bosque fragmentado con 33 t/ha^{-1} .

Los principales factores de incidencia sobre los incendios forestales en los BAM del Estado de México son las actividades forestales, tales como saneamientos, aclareos y la extracción en bosques semidensos y fragmentados, al tiempo en el que éstos están estrechamente relacionados con la práctica del pastoreo principalmente de ganado ovino y bovino, la cantidad de combustible muerto y la presencia de incendios en épocas pasadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agee, J., L. Bradshaw, S. Gutsell, E. Heyerdahl, R. Keane, K. Lertzman y K. McKelvey, (1999), "Links among fire effects, fuels, and climate". En: Schmolz, D., D. Peterson, R. Keane, J. Lenihan, D. McKenzie, D. Weise y D. Sandberg. "Assesing the effects of fire. Disturbance on ecosystems: A scientific agenda for research and management". Pacific Northwest Research Station. Portlan Oregon, pp. 104.
- Almeida, L., J. De Azcárate, A. Cleef, A. González, (2004), "Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevad de Toluca, Región Central de México", *Phytocoenologia*, Volume 34, Number 1, 1, Pp. 91-132(42).
- Arnaldos-Viger, J., Navalón-Nonell, X., Pastor-Ferrer, E., Planas-Cuchi, E., Zárate-López, L. (2004), *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*, 1st ed. Mundi Prensa, Madrid, España.
- Austin, P. (1990), "Community theory and competition in vegetation". En Granados, D., G. López y M. Hernández (2007), "Ecología y silvicultura en bosques templados". *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 13. UACH. Chapingo, México. pp. 67-83.
- Ávila, F., G. Pompa y P. Vargas, (2010), "Análisis Espacial de la Ocurrencia de Incendios Forestales en el Estado de Durango". *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 16, núm. 2, UACH. Chapingo, México. pp. 253-260.
- Badía P. (1998), "Distribución espacio-temporal de los incendios en el área metropolitana de Barcelona, análisis de la relación entre localización, no. de incendios, superficie quemada y tipo de vegetación", *Serie Geográfica*, Vol 7. pp. 109-128.
- Bautista, A. y E. Treviño, (2005), "Caracterización de combustibles leñosos en el ejido pueblo nuevo, Durango". *Revista chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, año/vol. 11, número 001. UACH. Chapingo, México. pp. 51-56.
- Benítez, G. (1988), "Efectos del fuego en la vegetación herbácea de un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en la Sierra del Ajusco". En Rapoport, H. y I. López (eds.). "Aportes a la ecología urbana de la ciudad de México". MAB-Limusa. México, D. F. pp. 111-152.
- Brown, J. (1974), "Handbook for inventorying downed woody material". USDA Forest Service. General technical report. U.S. pp. 24
- Brown, J., D. Oberheu, M. Johnston, (1982), "Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West" (General Technical Report INT- 129), United States Department of Agriculture y Forest Service, Ogden, UT, U.S.
- Castañeda-Rojas, M. (2011), *Empleo de SIG para la identificación de zonas vulnerables a incendios forestales en el Estado de México*. Tesis de ECATSIG. UAEMéx. Pp. 56.
- Cedillo-Alonso, M. (2012), *Distribución espacial y análisis de la presencia de plagas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca*. Tesis de Licenciatura en Geografía, UAEMéx. Pp. 122.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2001), "Incendios forestales", serie fascículos.

-
-
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud and D. Williams, (1983), "Fire in the forestry", Forest fire behavior and effects. Vol. 1. John Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 450
 - Chávez, Á., G. Flores y J. Xelhuantzi, (2011), "Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales (SICCO)". Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Jalisco, México. Pp. 73.
 - Chávez, A., Flores, G., Xelhuantzi, J., Flores, E., De la Mora C. (2011b), Desarrollo de aplicaciones en internet para la gestión y estimación de cargas de combustibles forestales, VII Reunión Nacional de Innovación forestal, Querétaro 2012. [cd-rom].
 - Chuvieco, E. (1998), "Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica". Serie Geográfica, Vol. 6. Pp. 131-147.
 - Cibrián-Tovar, D., Méndez-Montiel, J., Campos-Bolaños, R., Yates-III, O. y Flores-Lara, J. (1995), Insectos Forestales de México/Forest Insect of México. Universidad Autónoma de Chapingo. SARH Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre de México. USDA Forest Service, Natural Resources Canada. Comisión Forestal de América del Norte FAO. Publication 6.
 - CONAFOR, Comisión Nacional Forestal, (2006), Los incendios forestales en México 2005. Primera edición, 2006. Pp. 149.
 - CONAFOR, Comisión Nacional Forestal, (2009), Incendios Forestales.
 - CONAFOR, Comisión Nacional Forestal, (2011), "Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2011", Coordinación general de Conservación y Restauración, Gerencia de protección contra incendios forestales. Gobierno federal, Pp. 17.
 - Drury, A. y Veblen, T. (2008), "Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico". Plant Ecology 197. Pp. 299-316.
 - Endara-Agramont, A., (2007), Estructura forestal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México, México. Pp. 76.
 - Endara-Agramont, A., (2010), Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Pp. 100.
 - Endara, A., S. Franco, Nava, G., Valdez, J. y Fredericksen, T. (2012), "Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico". Journal of Forestry Research. 23(1): Pp. 39-44.
 - Flores, J. y J. Benavides, (1994), "Efecto de las quemadas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino". Revista Terra, Vol. 12 (4). Pp. 393-400.
 - Flores, J., O. Rodríguez, M. Meléndez y O. Rosas, (2008). "Sitios de muestreo para el monitoreo de combustibles forestales SIMMCOF". Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, México. Folleto técnico No. 1. Pp 47.
 - Franco, S., H. Regil y B. Ordoñez, (2006), "Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca". Madera y Bosques 12 (1): Pp. 17-28.
 - Franco Mass, S., A. Endara y H. Regil, (2009), "Los Bosques del Nevado de Toluca", en Franco Mass, S. y Burrola Aguilar, C., Los hongos comestibles del Parque Nacional Nevado de Toluca. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México, Pp. 15-25.
 - Furniss, M. (1965), "Susceptibility of fire-injured Douglas-Fir to beetle attack in southern Idaho". Journal of Forestry.
 - García, E. (1981), Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Ed. Lanos. Pp. 71.
 - Granados, D., G. López y M. Hernández, (2007), "Ecología y silvicultura en bosques templados". Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, vol. 13. UACH. Chapingo, México. pp. 67-83.
 - Guzmán, G. y A. Rodríguez, (2008), "Modelos de riesgo y vulnerabilidad a Incendios Forestales a partir de condiciones naturales y antrópicas; Caso de estudio, Parque Nacional Tunari". FOMABO, Vol. 7, Pp. 40.
 - Hardy, C. (2005), "Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context". Forest Ecol. Manage. 211, Pp. 73-82.
 - Juárez, A. y D. Rodríguez, (2002), "Efecto de los incendios forestales en la regeneración natural de *Pinus oocarpa* var. *Ochoterena*". Revista Chapingo, Series ciencias forestales y del ambiente. Universidad Autónoma Chapingo, México, Pp. 125-130.
 - Kellogg, K., D. Mackenzie, L. Peterson y E. Hessler, (2008), "Spatial models for inferring topographic controls on historical low-severity fire in the eastern Cascade Range of Washington, USA". Landscape Ecology 23. Pp. 227-240.
 - Krzanowski, J. (1988), "Principles of multivariate analysis. A user's perspective". Clarendon Press, Oxford, UK.

-
-
- Madrigal, D. (1992), Ubicación y características generales del Estado de México en: Atlas Estado de México. Gobierno del Estado de México. Toluca, México. Pp. 85.
 - Martín, M., E. Chuvieco y I. Aguado, (1998a), "La incidencia de los Incendios Forestales". Serie Geográfica. Vol. 7, Pp. 23-36.
 - McKenzie, D., S. Miller, A. Falk, (2011), The Landscape Ecology of Fire. Springer Verlag.
 - Mendoza, A. (1977), "Datos meteorológicos de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, México". Información Técnica de Bosques 4(10): Pp. 23-25.
 - Miller, J. y J. Patterson, (1927), "Preliminary studies on the relation of fire injury to bark beetle attack in western yellow pine". Journal of Agricultural Research. Vol. 7. Pp. 597-613.
 - Miranda, R. (2000), "Determinación de las áreas de riesgos a incendios forestales del parque ecológico Chipinque, Nuevo León". ITESM, Centro de Calidad Ambiental. Monterrey, México.
 - Moreno, J. (1989), "Los ecosistemas terrestres mediterráneos y el fuego". Política Científica. Pp. 46-50.
 - Montero-García, I. (2004), Atlas Arqueológico de la Alta Montaña Mexicana. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. México. ISBN: 968-6021-14-0. Pp. 180
 - Morfín-Ríos, J.E., Jardel-Peláez, E, Alvarado-Celestino, E. y Michel-Fuentes, J. (2012), Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México. Pp. 59.
 - Nájera, J. y E. Hernández, (2007), "Estimación de la carga de combustibles forestales en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango". Tecnointelecto, Pp. 28-31.
 - Porrero-Rodríguez, M. (2001), Incendios forestales, investigación de causas. Mundi-Prensa, Madrid, España.
 - PROBOSQUE, Protectora de Bosques del Estado de México, (2012), "reporte de incendios", manuscrito, Pp. 54.
 - Pyne-J, S. (1995), World fire: the culture of fire on Earth. Washington Press, Washington, D.C., USA.
 - Pyne-J., Andrews-L, P and Laven-D, R. (1996), Introduction to wildland fire. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. USA, Pp.769.
 - Regil-García, H. (2005), Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. 2005.
 - Rentería, B., G. Treviño, J. Návar, O. Aguirre, y I. Cantú, (2005), "Caracterización de combustibles leñosos en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango". Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, año/vol. 11, número 001. Universidad Autónoma Chapingo, México. Pp. 51-56.
 - Rodríguez, D. (1994), "La lucha contra el fuego. Guía para la prevención, supresión y supresión de incendios forestales". Universidad Autónoma Chapingo. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, SARH. Pp.171.
 - Rodríguez-Trejo, D. (1996), Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa México, Pp. 630.
 - Rodríguez, D. (2001), "Ecología del fuego en el ecosistema de Pinus hartwegii Lindl". Revista Chapingo, Pp. 145-151.
 - Rodríguez, D. y P. Fulé, (2003). "Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal". International Journal of Wildland Fire. Pp 23-37.
 - Rothermel, C. (1983), "How to predict the spread and intensity of forest and range fires". USDA, For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-Pp. 143. 161.
 - Sánchez, J. y G. Zerecero, (1983), "Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca". Centro de Investigaciones Forestales del Norte.
 - Schultz, G., A. Heil, J. Hoelzemann, A. Spessa, K. Thonicke, G. Goldammer, C. Held, M. Pereira and M. Bolscher, (2008), "Global wildland fire emissions from 1960 to 2000". Global Biogeochemical Cycles 22, GB2002.
 - Show, S. y B. Clarke, (1953), "La lucha contra los incendios forestales". FAO.
 - Sosa, C., S. Cedeño, G. Rodríguez, D. Martínez y M. Raygoza, (1999), "Incendios forestales". SEGOB y SEMARNAP. México, D.F.
 - Steubin-L., Godoy-R., Alberdi-M. (2001), Métodos de ecología vegetal. Editorial Universitaria. Santiago de Chile. Pp 160-175.
 - Suckling, D., A. Gibb, J. Daly, X. Chen, X. y E. Brockerhoff, (2001), "Behavioral and electrophysiological responses of *Arhopalus tristis* to burnt pine and other stimuli". Journal of Chemical Ecology. Vol. 6. Pp. 1091-1104.
 - Sullivan, B., C. Feetig, W. Otrosina, M. Dalusky, C. Berisford, (2003), "Association between severity of prescribed burns and subsequent activity of conifer infesting beetles in stands of longleaf pine". Forest Ecology and Management.

-
-
- Valdez, J. (2002), "Aprovechamiento forestal de manglares en el Estado de Nayarit, costa Pacífica de México". *Madera y Bosques*. Número especial 1: Pp.129-145.
 - Vera-Gaxiola, F., (1980), Presentación de la técnica de intersecciones planares en un caso de inventario de residuos forestales en el campo experimental Zoquiapan, México. Tesis de Ingeniero Agrónomo especialista en bosques.
 - Villers, L., L. García del Valle, J. López, (1998), "Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca". *Investigaciones Geográficas*, 36: Pp. 7-21.
 - Villers, L. y J. López, (2004), "Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche". En: "Incendios Forestales en México. Métodos de evaluación". Centro de ciencias de la Atmósfera, Universidad Autónoma Nacional de México, México. Pp. 164.
 - Villers, L. (2006), "Incendios Forestales". *Ciencias*. Núm. 081. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. Pp 60-66.
 - Wong, J. y L. Villers, (2007), "Evaluación de los combustibles y su disponibilidad en Incendios forestales. Un estudio en el Parque Nacional la Malinche". *Investigaciones Geográficas*, Abril, núm. 062. México, Pp. 87-103.
 - Wong-González, J. (2011), Determinación de peligro en Incendios Forestales en el municipio de Santa María Yavesia. Oaxaca México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de México.
 - Yang, J., H. Hong, S. Stephen and J. Gustafson, (2007), "Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark highlands". *Forest Science* 53(1) Pp. 1-15.
 - Zapata, C. (1991), "Determinación de indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible". Seminario de Titulación. DICIFO, UACH. Chapingo, Estado de México.

9. CONCLUSIONES GENERALES

Con la presente investigación se concluye que, desde el punto de vista metodológico la utilización de herramientas como los SIG y técnicas de fotointerpretación para identificación de zonas densas, semidensas y fragmentadas, tomando como base la cobertura de copa de los árboles, es importante para realizar un diagnóstico sencillo sobre las condiciones en las que se encuentra el BAM, pudiéndose seleccionar sitios precisos para su posterior caracterización a través de inventarios forestales y de combustibles sobre el suelo de una manera planificada y estructurada.

Se identificaron cuatro capas o estratos verticales de la vegetación, con diferencias significativas entre alturas: el sotobosque, compuesto por arbustos y pastos (50 cm), estrato inferior (3 m), estrato intermedio (10 m) y el estrato superior (18 m).

De todos los parámetros analizados (11), los que más contribuyeron en la vulnerabilidad a incendios en BAM del Estado de México son las actividades forestales, tales como saneamientos, aclareos y la extracción en bosques semidensos y fragmentados, al tiempo en el que éstos están estrechamente relacionados con la práctica del pastoreo principalmente de ganado ovino y bovino, la cantidad de combustible muerto y la presencia de incendios en épocas pasadas.

La carga de combustible muerta está determinada por las actividades fitosanitarias. Éstas implican generalmente podas laterales y aclareos, pero no la extracción del material, generando grandes cantidades de combustible disponibles a quemarse, principalmente en bosques fragmentados. Estas áreas, al ser más abiertas, los combustibles tienden a perder humedad más rápido, acelerando el proceso de combustión ante la presencia del fuego,

generando incendios intensos con mayor resistencia al control. Por lo anterior, se acepta la hipótesis planteada, dónde se establece que los bosques fragmentados de alta montaña son los más vulnerables a incendios forestales.

10. RECOMENDACIONES GENERALES

Debido a que las actividades forestales (fitosanitarias y extracción), el pastoreo, la carga de combustible y la presencia de incendio en épocas pasadas, fueron los parámetros de mayor importancia en el análisis de vulnerabilidad, se propone darle un manejo a los combustibles forestales, promoviendo actividades de extracción y recolección dirigida de leña en estas áreas, como medida preventiva a incendios que pueden durar varias horas provocando efectos severos, debido a la acumulación de leños mayores a 7.5 cm de diámetro. Esta actividad se recomienda realizar posterior a la aplicación de métodos de control fitosanitarios, principalmente en bosques fragmentados del BAM.

Se sugiere reglamentar la quema de pastizales dentro de las quemas prescritas y, de ser posible, realizar un ordenamiento predial destinando áreas exclusivas para el pastoreo, aunado a la concientización de los comuneros para la evitar la extracción de árboles. Lo anterior contribuirá de manera particular a la prevención integral de incendios forestales en la zona de estudio.

10. LITERATURA CITADA

- Aguirre B., C.; Rey C., J. A. 1980. Escorrentía y pérdida de suelo en asociaciones vegetales sujetas a quemas controladas. *Revista Chapingo* 23-24: 18-24 pp.
- Almeida, L., J. De Azcárate, A. Cleef, A. González. 2004. Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevad de Toluca, Región Central de México. *Phytocoenologia*, Volume 34, Number 1, 1. 91-132(42) pp.
- Arnaldos Viger, J., X. Navalón Nonell, E. Pastor Ferrer, E. Planas Cuchi, L. Zárate López. 2004. *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales* 1ra ed. Mundi Prensa, Madrid, España.
- Arriaga, L. y Gómez, L. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En: J. Martínez y A. Fernández (Compiladores.) INE/SEMARNAT. México, D.F. 255-265 pp.
- Ávila, F., Pompa G. y Vargas P. 2010. Análisis Espacial de la Ocurrencia de Incendios Forestales en el Estado de Durango. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 16, núm. 2, Chapingo, México. 253-260 pp.
- Badía P. 1998. Distribución espacio-temporal de los incendios en el área metropolitana de Barcelona, análisis de la relación entre localización, no. de incendios, superficie quemada y tipo de vegetación. *Serie Geográfica. Vol 7.* 109-128 pp.
- Benítez B., G. 1988. Efectos del fuego en la vegetación herbácea de un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en la Sierra del Ajusco. En Rapoport, E. H. y López M., I. R. (eds.). *Aportes a la ecología urbana de la ciudad de México.* MAB-Limusa. México, D. F. 111-152 pp.
- Botello, A., Villanueva, S., Gutiérrez, J. y Rojas, J. 2010. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Gobierno del Estado de Tabasco.* Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 pp.
- Brinker R. y Paul R. 1982. *Topografía moderna.* México, editorial Harla 6ta edición. 542 pp.
- Brown, J. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service. General technical report. U.S. 24 pp.
- Brown, J., D. Oberheu, M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West (General Technical Report INT- 129). United States Department of Agriculture y Forest Service. Ogden, UT, U.S. 52 pp.
- Buzai, D. y Baxendale, A. 2006. Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Ed. Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 400 pp.
- Campos, J.L. 1993. Claves para la determinación de los pinos mexicanos. Universidad Autónoma Chapingo, México 22: 70 pp.
- Capó, M. 1999. La estimación de riesgo como ayuda a la prevención de incendios. Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas. UNAM. Programa Universitario del Medio Ambiente. 53 pp.
- Castro, U. 2003. Supervivencia de *Pinus hartwegii* Lindl. en áreas incendiadas en el Ajusco, D.F. Tesis profesional en Ingeniería forestal, Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Edo. México. 54 pp.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2001. *Incendios forestales.* Serie fascículos.

-
-
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud and D. Williams. 1983. *Fire in the forestry, Forest fire behavior and effects*. Vol. 1. John Wiley & Sons, Inc. USA. 450 pp.
- Chávez, Á., Flores, J. y Xelhuantzi, J. 2011. *Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales (SICCO)*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Jalisco, México. 73 pp.
- Chuvienco, E. 1998. Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica. Serie Geográfica, Vol. 6. 131-147 pp.
- Cibrián, D., Méndez, J., Campos, R., Yates III, O. y Flores, J. 1995. *Insectos Forestales de México/Forest Insect of México*. Universidad Autónoma de Chapingo. SARH Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre de México. USDA Forest Service, Natural Resources Canada. Comisión Forestal de América del Norte FAO. Publication 6.
- CONAFOR. 2009. Comisión Nacional Forestal. *Incendios Forestales*.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal. 2012. Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2012. Coordinación general de Conservación y Restauración, Gerencia de protección contra incendios forestales. Gobierno federal. 18 pp.
- Countryman, C. 1978. Radiation and wildland fire. Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Berkeley, California. 1-17 pp.
- Drury, A. y Veblen, T. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecology* 197. 299-316 pp.
- Eguiluz, T. 1978. Ensayo de la Integración de Conocimientos sobre el Género Pinus en México. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Encina J., F. Encina, E. Matarocha y J. Valdez. 2008. Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín del a Sociedad Botánica de México*, Núm. 83; 13-24 pp.
- Endara, A. 2007. Estructura forestal de Pinus hartwegii en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México, México. 76.
- Endara, A. 2010. Análisis de los procesos de recuperación en el bosque templado del Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 100 pp.
- Endara, A., S. Franco, G. Nava, G., J. Valdez y T. Fredericksen. 2012. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research*. 23(1): 39-44 pp.
- Endara, A., R. Calderón, G. Nava y S. Franco. 2013. Analysis of Fragmentation Processes in High-Mountain Forests of the Centre of Mexico. *American Journal of Plant Sciences*. 4:697-704 pp.
- Ern, H. 1973. Repartición, ecología e importancia económica de los bosques de coníferas en los estados mexicanos de Puebla y Tlaxcala. *Com. Proy. Pue. Tlax.* 7:21-23 pp.
- Espinoza, L., D. Rodríguez, F. Zamudio. 2008. Sinecología del sotobosque de Pinus hartwegii dos y tres años después de quemas prescritas. *Agrociencia*. 14 pp.

-
-
- Etxeberri, P., Brazaola, A. y Edes, M. 2002. Cartografía de peligro de incendios forestales mediante Sistemas de Información Geográfica y modelos de propagación. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España.
- Flores, J. y Benavides, J. 1994. Efecto de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Terra* Vol. 12 (4). 393-400 pp.
- Flores, J. 1996. Aplicación de los sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica para el mapeo de riesgos de incendios forestales. INIFAP. Folleto Informativo No. 1. México. 16 pp.
- Flores, J., Rodríguez, O., Meléndez, M. y Rosas, O. 2008. Sitios de muestreo para el monitoreo de combustibles forestales SIMMCOF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, México. Folleto técnico No. 1. 47 pp.
- Fonseca, J., Meza, J. y Parcerisa, Q. 2007. Influencia de los Incendios sobre la presencia de insectos en un Bosque de *Pinus rudis* Endl. Consultado en Línea http://www.uaeh.edu.mx/sistema_investigacion/funciones/bajarArchivo_web.php?producto=2950&archivo=7.pdf. 02 de Octubre de 2012.
- Foresberg, M. 1971. Moisture calculations for the 100 hour timelag fuels for fire danger rating. USDA For. Serv. Res. Note RM-199. 7 pp.
- Franco, S., H. Regíl, C. González y G. Nava. 2006. Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 61; 38-57 pp.
- Furniss, M. 1965. Susceptibility of fire-injured Douglas-Fir to beetle attack in southern Idaho. *Journal of Forestry*.
- García, E. 1981. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. Ed. Lanos. 71 pp.
- García de Pedraza, L. y García, M. 1987. La meteorología y los incendios forestales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- García, M. 2013. Patrones de distribución de *Pinus hartwegii*, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Licenciatura. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. 116 pp.
- González, R. y Rodríguez, D. 2004. Efecto del chamuscado de copa en el crecimiento de diámetro de *Pinus hartwegii* Lindl en el Distrito Federal, México. *Agrociencia* vol. 38. 537-544 pp.
- Gutman, P. 1986. Evaluación de impactos ambientales en Programas de Transporte. *Revista Interamericana de Planificación*. núm. 20. 30-39 pp.
- Guzmán, G. y Rodríguez, A. 2008. Modelos de riesgo y vulnerabilidad a incendios forestales a partir de condiciones naturales y antrópicas; Caso de estudio, Parque Nacional Tunari. Vol. 7. FOMABO. 40 pp.
- Hardy, C. 2005. Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. *Forest Ecol. Manage.* 211. 73-82 pp.
- Harper, J.L. 1977. *Population biology of plants*. Academic Press, London, England. 892 pp.

-
-
- Hawksworth, F. 1983. Mistletoes as forest parasites. Calder, M. and Bernhardt, P., eds. The biology of mistletoes. Sydney: Academic Press. 317–333 pp.
- Hernández, A.J.C., G.G. Gutiérrez., L.L. Almeida., D.J.A.B. Ordóñez. 2005. Análisis dendroclimático de *Pinus hartwegii* en el volcán nevado de Toluca. México. I Simposio Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México. Memorias. Laboratorio de Biotecnología y Ecología Aplicada. LABIOTECA. Xalapa, Veracruz, México. Noviembre 17 y 18, 2005. 102-103 pp.
- ICONA. 1987. Guía fotográfica para la identificación de modelos de combustibles. MAPA.
- Kellogg, K., Mackenzie, D., Peterson, L. y Hessel, E. 2008. Spatial models for inferring topographic controls on historical low-severity fire in the eastern Cascade Range of Washington, USA. *Landscape Ecol* 23. 227-240 pp.
- Lillesand, T. y R. Kiefer. 1994. *Remote sensing and image interpretación*. 3ra ed. New York. 750 pp.
- Louman, B., D. Quiros., M. Nilsson. 2001. *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 265 pp.
- Madrigal, D. 1992. Ubicación y características generales del Estado de México en: *Atlas Estado de México*. Gobierno del Estado de México. Toluca, México. 85 pp.
- Martín, M., Chuvieco, E. y Aguado, I. 1998a. La incidencia de los Incendios Forestales. Serie Geográfica. Vol. 7. 23-36 pp.
- McKenzie, D., S. Miller, A. Falk. 2011. *The Landscape Ecology of Fire*. Springer Verlag.
- McRae, J., Alexander, E., Stocks, J. 1979. Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns. A handbook. Dep. Environ., Can. For. Serv., Sault Ste. Marie, Ontario Report 0-X-287. 44 pp.
- Mendoza, B., M. A. 1977. Datos meteorológicos de la Estación de enseñanza e investigación forestal zoquiapan, México. *Información Técnica de Bosques* 4(10): 23-25 pp.
- Miller, J. y Patterson, J. 1927. Preliminary studies on the relation of fire injury to bark beetle attack in western yellow pine. *Journal of Agricultural Research*. Vol. 7. 597-613 pp.
- Miranda, R. 2000. Determinación de las áreas de riesgos a incendios forestales del parque ecológico Chipinque, Nuevo León. ITESM, Centro de Calidad Ambiental. Monterrey, México.
- Montero, I. 2004. *Atlas Arqueológico de la Alta Montaña Mexicana*. Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. México. ISBN: 968-6021-14-0. 180 pp.
- Moreno, J. 1989. Los ecosistemas terrestres mediterráneos y el fuego. *Política Científica*. 46-50 pp.
- Morfín, J., E. Jardel, E. Alvarado y J. Michel. 2012. *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México. 59 pp.
- Nava, G., A. Endara, H. Regíl, C. Estrada, C. Arriaga y S. Franco. 2009. *Atlas Forestal del Estado de México*. Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto en Ciencias Agropecuarias y Rurales. ISBN: 978-607-422-068-1.
- Nájera, J. y E. Hernández, E. 2007. Estimación de la carga de combustibles forestales en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Tecnointelecto*. 28-31 pp.

-
-
- Nelson, R. Jr. 2001. Water relations of Forest Fuels, en Jonson, E. and K. Miyanishi, Forest fires, behavior and ecological effects, Academic Press.79-149 pp.
- Peñaranda, R. 2000. Riesgos de la deforestación en el bosque de uso múltiple del Trópico de Cochabamba. Tesis de Maestría, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.
- Pérez, R. 1981. Los incendios forestales como vectores de las plagas del bosque. Revista Ciencia Forestal. Vol. 6. 17-30 pp.
- Perry, JR., J. P. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon. 231 pp.
- Porrero, R. 2000. *Incendios Forestales I. Investigación de causas*. Mundi-Prensa. 158 pp.
- PROBOSQUE, Protectora de Bosques del Estado de México. 2012. Reporte de incendios. Manuscrito. 54 pp.
- Pyne J., L. Andrews and R. Laven. 1996. *Introduction to wildland fire*. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. USA.769 pp.
- Ramírez, M., M. Jiménez, A. Martínez. 2005. Estructura y densidad de la Red de caminos en la reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. Investigaciones Geográficas. Número 057. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México 14 pp.
- Regíl, H. 2005. Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. 2005.
- Reid, J. 1997. Consecuencias económicas y biológicas de la construcción de caminos en las tierras bajas de Bolivia: un método de evaluación rápida. Documento técnico núm. 53, mayo [<http://bolfor.chemonics.net/DOCUMENT/dt53e.pdf>: 08 Mayo 2005].
- Rentería, B., G. Treviño, J. Návar, O. Aguirre y I. Cantú. 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, año/vol. 11, número 001. Universidad Autónoma Chapingo, México. 51-56 pp.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México, D. F. 432 pp.
- Rzedowski, J. 1981. Principales comunidades vegetales. En: Rzedowski, J. y Rzedowski, G. C. DE (eds.). Flora fanerogámica del Valle de México. Vol. I. CECSA. México, D. F. 47-54 pp.
- Rodríguez, D. 1994. *La lucha contra el fuego*. Guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, SARH. 171 pp.
- Rodríguez, D. 1996. *Incendios forestales*. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa México. 630 pp.
- Rodríguez, D. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Chapingo. 145-151 pp.
- Rodríguez, D., M. Rodríguez, F. Fernández y S. Pyne. 2002. *Educación e incendios forestales*. Mundi-Prensa, México.
- Rodríguez, D. y P. Fulé. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. International Journal of Wildland Fire. 23-37 pp.

-
-
- Rothermel, C. 1983. A mathematical model for fire spread predictions in Wildland fuels, USDA Forest Service, Int. USA.
- Sánchez, J., G. Zerecero. 1983. Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Centro de Investigaciones Forestales del Norte.
- Schultz, G., A. Heil, J. Hoelzemann, A. Spessa, K. Thonicke, G. Goldammer, C. Held, M. Pereira and M. Bolscher. 2008. Global wildland fire emissions from 1960 to 2000. *Global Biogeochemical Cycles* 22, GB2002.
- Serrada, R. 2008. Influencia de los factores ecológicos en la vegetación. Apuntes de Selvicultura. Servicio de Publicaciones. EUIT Forestal. Madrid.
- Sitoe, A. y N. Riveiro. 1995. Miombo book Project (Case Study of Mozambique). DEF, UEM, Maputo.
- Show, S. y B. Clarke, B. 1953. La lucha contra los incendios forestales. FAO.
- Sosa, C., S. Cedeño, G. Rodríguez, D. Martínez y M. Raygoza. 1999. Incendios forestales. SEGOB y SEMARNAP. México, D.F.
- Steubin, L., R. Godoy., M. Alberdi. 2001. Métodos de ecología vegetal. Editorial Universitaria. Santiago de Chile. 160-175 pp.
- Suckling, D., A. Gibb, J. Daly, X. Chen y E. Brockerhoff. 2001. Behavioral and electrophysiological responses of *Arhopalus tristis* to burnt pine and other stimuli. *Journal of Chemical Ecology*. Vol. 6. 1091-1104 pp.
- Sullivan, B., C. Feetig, W. Otrosina, M. Dalusky and C. Berisford. 2003. Association between severity of prescribed burns and subsequent activity of conifer infesting beetles in stands of longleaf pine. *Forest Ecology and Management*.
- Valdez, J. 2002. Aprovechamiento forestal de manglares en el Estado de Nayarit, costa Pacífica de México. *Madera y Bosques*. Número especial 1:129-145 pp.
- Veblen, T. 1992. Regeneration dynamics. In: *Plant Succession: Theory and Prediction*. Glenn-Lewin, D.C., R. K. Peet, T. Veblen. Eds. Chapman & Hall, London. 152-187 pp.
- Vélez, R. 1983. Sequía e incendios forestales. *Vida Silvestre* 47: 186-197 pp.
- Vélez, R. 2000. La defensa contra los incendios forestales, McGraw-Hill, España.
- Vélez, R. 2009. La defensa contra incendios forestales, fundamentos y experiencias. 2da. Edición. Mc Graw Hill. España. 840 pp.
- Vera, F. 1980. Presentación de la técnica de intersecciones planares en un caso de inventario de residuos forestales en el campo experimental Zoquiapan, México. Tesis de Ingeniero Agrónomo especialista en bosques.
- Viegas, D. 1998. Manual sobre incendios florestais. Lisboa, Secretaría-Geral do Ministério do Planeamento e da Administracao do Territorio.
- Villers, L., J. López, J. Hernández e I. Trejo. 1995. Delimitación de áreas de bosque en predios forestales en el Nevado de Toluca, México: integrando en SIG, inventarios, imágenes MSS y fotomapas. *Memorias del VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*. Puerto Vallarta, México. Instituto de Geografía, UNAM, México. 621-627 pp.
- Villers, L. y J. López. 1996. Evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en el Cinturón Volcánico Transmexicano: el caso de la cuenca del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas Boletín*. Instituto de Geografía, UNAM, México. Núm. 31; 69-92 pp.

-
-
- Villers, L., L. García del Valle y J. López. 1998. Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas* 36: 7-21 pp.
- Villers, L. y J. López. 2004. Comportamiento del fuego y evaluación del riesgo por incendios en las áreas forestales de México: un estudio en el volcán la Malinche. En: *Incendios Forestales en México. Métodos de evaluación*. Centro de ciencias de la Atmósfera, Universidad Autónoma Nacional de México, México. 164 pp.
- Villers, L. 2006. *Incendios Forestales. Ciencias*. Núm. 081. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 60-66 pp.
- Wong, J. y L. Villers. 2007. Evaluación de los combustibles y su disponibilidad en Incendios forestales. Un estudio en el Parque Nacional la Malinche. *Investigaciones Geográficas*, Abril, núm. 062. México. 87-103 pp.
- Wong, J. 2011. Determinación de peligro en Incendios Forestales en el municipio de Santa María Yavesia. Oaxaca México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de México.
- Yang, J., H. Hong, S. Stephen and J. Gustafson. 2007. Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark highlands. *Forest Science* 53(1). 1-15 pp.
- Zapata, C. 1991. Determinación de indicadores de peligro potencial de incendios forestales con base en la cuantificación del material combustible. Seminario de Titulación. DICIFO, UACH. Chapingo, Estado de México.

11. LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Tipo de bosque con relación a un gradiente altitudinal.....	4
Cuadro 2.	Pisos altitudinales térmicos de la alta montaña mexicana.....	4
Cuadro 3.	Clasificación de combustibles forestales gruesos.....	13
Cuadro 4.	Modelos de combustible sobre el que progresa el incendio forestal.....	13
Cuadro 5.	Clasificación de causas de los incendios forestales en el Estado de México.....	15
Cuadro 6.	Datos de ubicación de los sitios de muestreo.....	33
Cuadro 7.	Perturbaciones ambientales.....	35
Cuadro 8.	Grado de perturbaciones.....	36
Cuadro 9.	Clasificación de la regeneración.....	37
Cuadro 10.	Daño y grado de daño en individuos ≥ 2.5 cm de DAP.....	38
Cuadro 11.	Relación del tiempo de retardo, diámetro de combustible y distancia de medición.....	41

12. LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> semidenso, Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan, 2012.....	3
Figura 2.	Sotobosque de Alta Montaña; a) Pastizal Alpino (<i>Lupinomontani-calamagrostion tolucensis</i>); b) Rosa de la Montaña (<i>Eryngium proteaeflorum delarf</i>); c) <i>Lupinus spp</i>	5
Figura 3.	Triángulo del Fuego.....	8
Figura 4.	Densidad Forestal: a) Denso, b) Semidenso y c) Fragmentado. Ladera Suroeste del PNNT, 2000.....	11
Figura 5.	Combustible forestal grueso muerto: a) 1 hora, b) 10 horas, c) 100 horas y d) 1000 horas.....	12
Figura 6.	a) <i>Pinus hartwegii</i> dañado por quema en la base del tronco, PNNT. b) Terracería en Sierra de las Cruces. c) Evidencia de corte en <i>Pinus hartwegii</i> , PNNT.....	17
Figura 7.	Actividades de pastoreo en el PNNT y Sierra de las Cruces, 2012.....	18
Figura 8.	Plagas forestales y plantas parásitas en Bosques de Alta Montaña. a) Muérdago enano (<i>Arceuthobium globosum</i> Hawksw. & Wiens subsp. <i>Grandicaule</i>), b) Muérdago enano (<i>Arceuthobium vaginatum</i> (Willd) Presl. subsp. <i>vaginatum</i>) y c) Descortezador (<i>Dendroctonus adjunctus</i>).....	19
Figura 9.	Quema prescrita como medida preventiva a Incendios Forestales inducidos, con fines de pastoreo en el ejido de Santa María del Monte dentro del PNNT, 2012..	20
Figura 10.	Práctica tradicional del sistema roza, tumba y quema en el PNNT, 2012.....	22
Figura 11.	Esquema metodológico general.....	29
Figura 12.	Área de estudio y distribución de sitios de muestreo en BAM del Estado de México.....	31
Figura 13.	Delimitación del sitio de muestreo.....	32
Figura 14.	Diseño del sitio de muestreo donde se agrupan sus tres sub-sitios.....	32
Figura 15.	a) GPSMAP® 60CS y b) BRUJULA-CLINOMETRO TANDEM SUUNTO.....	33
Figura 16.	Accesibilidad al BAM del Estado de México.....	35
Figura 17.	a) Fogatas de paseantes, b) Botellas de vidrio que generan el “efecto lupa”, c) Cercado limítrofe entre predios.....	36
Figura 18.	Medición y registro de altura de un brinzal, PNNT 2012.....	39
Figura 19.	a) Estimación de altura en pasto, b) Estimación de diámetro en arbusto y c) Estimación de altura en arbusto, PNNT.....	39
Figura 20.	Diseño de muestreo de combustibles forestales mediante transectos.....	40
Figura 21.	Proceso de secado y pesado de combustible forestal fino.....	42
Figura 22.	Interfaz del Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales en Web (SICCO).....	42
Figura 23.	Incendios Forestales en BAM del Estado de México, periodo 2006-2012.....	43

13. ANEXOS

Anexo 1. Formulario para inventario forestal

Inventario de individuos >2.5 cm DAP							
X:		Pendiente:		C=condición, 1=vivo, 2=muerto. DAP=Diám. altura de pecho			
Y:		Exposición:		DC= Diám. de copa. AT= altura total. AFL= Altura de fuste limpio			
Z:		Observaciones:					
No.	C	DAP (cm)	DC (m)	A.T. (m)	A.F.L.	Daño	Grado d. D.
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							

DAÑO: A= Fuego, B=Tala, C=Plaga, D=Nada. GRADO DE DAÑO: A=Sin daño, B=Daño medio, C=Muy dañado

Anexo 2. Formularios de regeneración y sotobosque

Regeneración y sotobosque			
Tipo: P=plántula, B=brinzal, L=latizal, A=arbusto, Pa=pasto			
No.	Tipo	Diámetro (cm)	Altura (m)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

Anexo 3. Formularios para inventario de combustible

INVENTARIO DE COMBUSTIBLE FORESTAL		
Sitio:		
Datos del transecto y del cuadro de 30 x 30 cm		
TRANSECTO A	Cobertura de capa de hojarasca:	Capa de hojarasca (cm):
Profundidad del matillo orgánico (cm):	Cobertura de capa de fermentación:	
	Cobertura de suelo mineral:	
Pendiente (grados):	Cobertura de capa de pastos:	Capa de fermentación (cm):
	Cobertura de capa de hierbas:	
Datos de la línea de intersecciones planares de 15 m.		
No. de intersecciones < 7.5 cm.		
1 hora:	10 horas:	100 horas:
Diámetro de las intersecciones 1000 horas		
Firmes:		
Podridos:		
Datos del transecto y del cuadro de 30 x 30 cm		
TRANSECTO B	Cobertura de capa de hojarasca:	Capa de hojarasca (cm):
Profundidad del matillo orgánico (cm):	Cobertura de capa de fermentación:	
	Cobertura de suelo mineral:	
Pendiente (grados):	Cobertura de capa de pastos:	Capa de fermentación (cm):
	Cobertura de capa de hierbas:	
Datos de la línea de intersecciones planares de 15 m.		
No. de intersecciones < 7.5 cm.		
1 hora:	10 horas:	100 horas:
Diámetro de las intersecciones 1000 horas		
Firmes:		
Podridos:		
Datos del transecto y del cuadro de 30 x 30 cm		
TRANSECTO C	Cobertura de capa de hojarasca:	Capa de hojarasca (cm):
Profundidad del matillo orgánico (cm):	Cobertura de capa de fermentación:	
	Cobertura de suelo mineral:	
Pendiente (grados):	Cobertura de capa de pastos:	Capa de fermentación (cm):
	Cobertura de capa de hierbas:	
Datos de la línea de intersecciones planares de 15 m.		
No. de intersecciones < 7.5 cm.		
1 hora:	10 horas:	100 horas:
Diámetro de las intersecciones 1000 horas		
Firmes:		
Podridos:		

Anexo 4. Ecuaciones para el cálculo de carga de combustible

Corrección de la Pendiente

El primer cálculo necesario es la corrección por factor pendiente (Brinker y Paul, 1982)

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\text{Pendiente } (\%)}{100}\right)^2}$$

En donde:

c= Factor de corrección por pendiente

Pendiente (%)= Es el porcentaje de la pendiente medida en campo

Estimación de cargas de combustibles de 1 hora

Para el cálculo de los combustibles de 1 hora se utiliza la siguiente ecuación:

$$1 \text{ hr} = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{Nl * (C_1)} * (C_2)$$

En donde:

1 hr= Combustibles de 1 hora en toneladas/hectárea

11.64= Constante

n= Número de intersecciones.

d= Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles menores a 0.6 cm de diámetro (0.0151).

s= Gravedad específica para combustibles inferiores a 0.6 cm de diámetro (0.48).

a= Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles inferiores a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c= Factor de corrección por pendiente.

Nl= Longitud del transecto en metros.

C₁= Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C₂= Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustibles de 10 horas

Para el cálculo de los combustibles de 10 horas se utiliza la siguiente ecuación:

$$10 \text{ hr} = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{Nl * (C_1)} * (C_2)$$

En donde:

10 hrs= Combustibles de 10 horas en toneladas/hectárea

11.64= Constante

n= Número de intersecciones.

d= Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles de 0.6 a 2.5 cm de diámetro (0.289).

s= Gravedad específica para combustibles de 0.6 a 2.5 cm de diámetro (0.48).

a= Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c= Factor de corrección por pendiente.

Nl= Longitud del transecto en metros.

C₁= Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C₂= Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustibles de 100 horas

Para el cálculo de los combustibles de 100 horas se utiliza la siguiente ecuación:

$$100 \text{ hr} = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{Nl * (C_1)} * (C_2)$$

En donde:

100 hrs= Combustibles de 100 horas en toneladas/hectárea

11.64= Constante

n= Número de intersecciones.

d= Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (2.76).

s= Gravedad específica para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (0.40).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección por pendiente.

Nl = Longitud del transecto en metros.

C_1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C_2 = Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustibles de 1 000 horas firmes

Para el cálculo de los combustibles de 1 000 horas en condición “Firme” se utiliza la siguiente ecuación:

$$1\ 000\ \text{hr F} = \frac{11.64 * (\sum d^2 * C_3) * s * a * c}{Nl * (C_1)} * (C_2)$$

En donde:

1 000 hrsF= Combustibles de 1 000 horas firmes en toneladas/hectárea

11.64= Constante

$\sum d^2$ =Sumatoria de diámetros de combustibles encontrados

s = Gravedad específica para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (0.40).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección por pendiente.

Nl = Longitud del transecto en metros.

C_1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C_2 = Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

C_3 = Constante para conversión de cm a pulgadas (0.3937)

Estimación de cargas de combustibles de 1 000 horas podridos

Para el cálculo de los combustibles de 1 000 horas en condición “Podridos” se utiliza la siguiente ecuación:

$$1\ 000\ \text{hr P} = \frac{11.64 * (\sum d^2 * C_3) * s * a * c}{Nl * (C_1)} * (C_2)$$

En donde:

1 000 hrsP= Combustibles de 1 000 horas podridos en toneladas/hectárea

11.64= Constante

Σd^2 =Sumatoria de diámetros de combustibles encontrados

s = Gravedad específica para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (0.30).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección por pendiente.

Nl = Longitud del transecto en metros.

C_1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C_2 = Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

C_3 = Constante para conversión de cm a pulgadas (0.3937)

Estimación de la carga de hojarasca

Las cargas de combustibles de hojarasca son estimadas con base a muestras obtenidas en campo, las cuales son procesadas en laboratorio para la medición de su peso seco, utilizando la siguiente ecuación:

$$Pch = \bar{X} \frac{x * C_3}{C_4}$$

Pch= Peso del combustible hojarasca en toneladas/hectárea.

\bar{X} = Promedio de pesos de los transectos.

x = Peso seco de las muestras

C_3 = Constante 10 000

C_4 = Constante 9 000