



Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios

Forest and forest fuels evaluation in *Pinus hartwegii* forests of the State of Mexico, in relation to cover densities and fire vulnerability

Mario Fermin Castañeda Rojas¹, Angel Rolando Endara Agramont¹, María de Lourdes Villers Ruiz²
y Eufemio Gabino Nava Bernal¹

¹Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR). Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx). Estado de México. México. castaneda.mariof@gmail.com; arendaraa@uaemex.mx; gnavab@uaemex.mx.

²Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Autónoma de México (UNAM). México, D.F. México. villers@atmosfera.unam.mx.

RESUMEN

En el presente estudio se hace una evaluación forestal asociada a la cantidad y calidad de combustibles muertos en bosques de *P. hartwegii* para señalar condiciones de vulnerabilidad y propensión a incendios. Con interpretación de imágenes de satélite multiespectrales del 2010, se determinaron tres densidades de cobertura para 23 685 ha de bosque de *P. hartwegii* del Estado de México. Se realizó un inventario forestal, presencia de actividad humana, carga de combustibles y parámetros físicos en 30 sitios de muestreo de 1000 m². La estimación de la cantidad y tipo de combustible se realizó bajo la técnica de intersecciones planares. Se calculó el área basal, biomasa forestal y la estructura vertical, por sitio y clase de cobertura. Los resultados señalan que existen diferencias entre las tres categorías relativas a densidad arbórea (ind ha⁻¹) área basal (m²) y cantidad de biomasa (t ha⁻¹) así como de la estructura vertical de los bosques. Se presenta mayor cantidad de combustibles en los bosques fragmentados con 33.81 t ha⁻¹, principalmente de clases diamétricas grandes (de 2.5 cm a 7.5 cm, así como ≥ 7.5 cm de diámetro); donde el fuego reside más tiempo en momentos de una conflagración. Las actividades antrópicas desarrolladas en estas áreas desencadenaron esta situación, que se presenta como un riesgo que debe ser atendido en la zona. La metodología empleada es propicia para el análisis de grandes áreas forestales, permitiendo determinar las características del entorno vivo y del combustible muerto, brindando elementos útiles para declarar áreas vulnerables a incendios en el marco de un Programa de Manejo Integral del Fuego.

PALABRAS CLAVE: áreas vulnerables a incendios, bosque de alta montaña, combustibles forestales, Manejo Integral del Fuego, riesgo de incendios.

ABSTRACT

A forest evaluation in relation to dead wood fuel materials quantity and quality in *Pinus hartwegii* forests was made, in order to show vulnerability conditions and fire propensity. Based on a multispectral satellite images (2010) interpretation, 23,685 ha of *P. hartwegii* forest in the State of Mexico were grouped in three forest cover classes. A forest inventory, human activity presence, forest fuels and physical parameters measurements were carried out in 30 circular plots of 1,000 m². Forest fuels quantity and types were assessed following a planar intersect method. Basal area, forest biomass and vertical structure were also measured per site and cover class. The results show differences between the three categories concerning, tree densities coverage (ind ha⁻¹) basal area (m²) and amount of biomass (t ha⁻¹) as well as the vertical structure of forests. Higher quantity of forest fuels occurs in fragmented forests (33.81 t ha⁻¹), of high diameter classes mainly (from 2.5 cm to 7.5 cm, and ≥ 7.5 cm diameter), where fire resides longer in times of a conflagration. Human activities in these areas trigger this situation, a risk that has to be addressed in the area. The application of this methodology could be used in bigger areas of any other forest ecosystem, allowing the determination of the living environment and vulnerability areas, providing useful elements for Integrated Fire Management (IFM) programs.

KEY WORDS: fire vulnerability, high mountain forest, forest fuels, Integrated Fire Management, fire risk.

INTRODUCCIÓN

El Estado de México cuenta con 740 980.97 ha de bosque, las cuales representan 33.19% del total de la superficie de la entidad (Nava *et al.*, 2009). Los bosques de alta montaña, están representados por la especie *Pinus hartwegii*, encontrándose a partir de los 3500 m snm (Endara *et al.*, 2013). Estos bosques establecen el límite de la vegetación arbórea de México y son desplazados por zacatonales entre los 3000 m y los 4000 m snm, por los incendios y pastoreo (Rzedowski, 1978).

Estas zonas son objeto de la presencia recurrente de incendios forestales (Madrigal, 1992; Villers *et al.*, 1998; Encina *et al.*, 2008) provocados en 80% por el hombre (Probosque, 2012), en donde las actividades forestales, las quemadas continuas con el objeto de inducir el renuevo del pasto para el ganado y la cantidad de combustibles son los principales factores que hacen a un bosque vulnerable a quemarse (Castañeda, 2013).

Aún cuando se reconoce que el fuego es un elemento importante para la repoblación del *Pinus hartwegii* (Sarukhán y Franco, 1981, Rodríguez-Trejo, 2001), la acumulación natural de combustible, la actividad antrópica y la frecuencia de fuego en estos bosques, afecta a una gran cantidad de plántulas y brinzales, pues se ha comprobado que el elevado contenido de resinas y aceites esenciales que presentan los hacen altamente inflamables y son más sensibles en etapas tempranas de desarrollo, donde la corteza no es lo suficientemente gruesa para protegerlos del fuego (Vélez, 2009). Las cargas de combustibles varían en función de la etapa sucesional del bosque, de su altitud y tipo y nivel de disturbio presente (Rodríguez-Trejo, 2001).

La caracterización forestal en términos de densidad del arbolado y la cantidad de biomasa (Louman *et al.*, 2001; Fragoso, 2003; Rojas y Villers, 2008; Endara *et al.*, 2012) permiten conocer de manera puntual la estructura del bosque en el proceso de fragmentación (Veblen, 1992; Aguirre *et al.*, 2003; Endara *et al.*, 2013). Asimismo la cuantificación de combustibles muertos, que incluye troncos derribados, árboles muertos en pie, restos de ramas, ramillas, hojas, que se encuentran sobre el suelo, aunado

al desarrollo de actividades antrópicas sobre estas áreas, permiten caracterizar la carga de combustible, esto es, la cantidad y calidad del material susceptible a que se incendie y establecer un cierto régimen y comportamiento del fuego (Chandler *et al.*, 1983; Flores y Benavides, 1994; Rodríguez-Trejo, 1994; 1996; Pyne *et al.*, 1996; Cenapred, 2001; Arnaldos *et al.*, 2004; Morfín *et al.*, 2012; Castañeda, 2013).

Conforme el combustible muerto y disponible sobre el suelo es más grande, perderá o ganará humedad más lentamente; es decir, tendrá un mayor tiempo de retardo para que su humedad se estabilice con la humedad del ambiente. De esta manera, se tienen combustibles según tiempos de retardo de 1 h, 10 h, 100 h y 1000 h, cuyos diámetros varían de 0 cm a 0.6 cm, 0.61 cm a 2.5 cm, 2.51 cm a 7.5 cm y ≥ 7.5 cm, respectivamente (Fosberg, 1970; Brown, 1974; Sánchez y Zerecero, 1983; Alvarado, 1986; Villers *et al.*, 2006; Flores *et al.*, 2008). La evaluación y clasificación de estos combustibles son usadas entre otras cosas, para modelar el comportamiento del fuego (Deeming y Brown, 1975; Flores, 2001; Villers y López, 2004; Orozco, 2008).

Los combustibles finos clasificados como de 1 h y 10 h, son materiales que pierden humedad rápidamente y están disponibles a incendiarse en un periodo muy breve después de lluvia y en su totalidad durante la temporada de seca anual. Los más gruesos de 100 h y 1 000 h, se incorporan al combustible fino tras un periodo de sequía largo o en un incendio en el que se generen grandes cantidades de calor, asimismo, por su diámetro mayor permanecerán ardiendo más tiempo que los combustibles finos (Vélez, 2009), por lo tanto, las cargas totales de combustibles relativamente bajas, pueden hacer suponer erróneamente un moderado comportamiento del fuego si no se considera la composición según las categorías (Rodríguez-Trejo, 2001).

Por otro lado, la hojarasca es el componente que arde con mayor prontitud y dispersa el fuego en los incendios superficiales (Arnaldos *et al.*, 2004; Pyne *et al.*, 1996). La combinación entre combustibles forestales, el oxígeno presente en la atmósfera y las fuentes de ignición hacen



prácticamente cualquier lugar del planeta con vegetación, vulnerable a incendiarse, cuando existan condiciones de estado del tiempo suficientemente secas (Pyne *et al.*, 1996; Van Wagendonk, 2006; Morfín *et al.*, 2012).

La caracterización del complejo de combustibles en los ecosistemas forestales es un aspecto fundamental para el manejo integral del fuego mediante acciones preventivas, sistema de alerta temprana, evaluación de los efectos de incendios y quemas prescritas. Asimismo, estas evaluaciones están muy relacionadas con estudios sobre la calidad del aire, la dinámica del carbono a través de inventarios y estimaciones de almacenes, captura y emisiones de gases de efecto de invernadero (Seiler y Crutzen 1980; Cordero *et al.*, 2002; Sandberg *et al.*, 2002; Ottmar *et al.*, 2007; Villers *et al.*, 2013).

El uso de imágenes satelitales aunado a las técnicas de interpretación visual utilizando Sistemas de Información Geográfica es de gran ayuda, para definir densidades de cobertura en los ecosistemas forestales, conjugados con la validación en campo (Villers *et al.*, 1995; Villers y López 1996; Regíl 2005; Franco *et al.*, 2006). Estas herramientas cada vez más precisas, son adecuadas no solo para caracterizar de manera básica las condiciones de grandes áreas forestales, sino también para integrar información y particularizar distintos aspectos ecológicos y de perturbación (Villers *et al.*, 1998; Endara 2007; 2010; Endara *et al.*, 2012).

OBJETIVO

Determinar diferencias estructurales y carga de combustibles disponibles sobre el suelo, según tres densidades de cobertura en los bosques de *Pinus hartwegii* del Estado de México que permitan señalar condiciones de vulnerabilidad y propensión a incendios forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área se localiza entre 18°59'01" y 19°18'50" latitud norte y 98°37'30" y 99°53'45" longitud oeste, de 3500 m a 4200 m snm, área donde se encuentran los bosques de

alta montaña (BAM). Esta zona corresponde a las partes altas del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), Sierra de las Cruces (SC) y Parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan (PNIZ-Pp-Z), (Fig. 1).

La vegetación arbórea del área de estudio está representada por *Pinus hartwegii*, la cual ocupa un total de 23 685 ha, en un clima semifrío, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 5 °C y 12 °C, con precipitaciones medias anuales de 967 mm a 1200 mm, con un régimen de lluvias en verano y con menos de 5% de la precipitación en invierno (Mendoza, 1977; García, 1981; Benítez, 1988).

Interpretación de imágenes de satélite y selección de sitios de muestreo

Se realizó una fusión entre imágenes de satélite multiespectrales (resolución de 10 m) y pancromáticas (resolución 2.5 m) del sensor Spot 5 (2010) bajo el método multidirección-multirresolución (MDMR) (Lillo y Consuelo, 2008). Se interpretaron visualmente y digitalizaron tres diferentes densidades de cobertura del BAM en el software ArcGIS 10 y PCI Geomatics, haciendo uso del tono, textura y densidad como elementos de interpretación (Lillesand y Kiefer, 1994).

Sobre una malla de 100 m², se consideró bosque denso a aquella superficie que presentara entre 80% y 100% de cobertura de copa en cada cuadrícula, bosque semidenso 50% a 79% y bosque fragmentado < 50% (Regíl, 2005).

La selección de los sitios, 30, de verificación e inventario forestal y de combustibles en campo, fue bajo criterios de: a) densidad de cobertura, b) evidencia o registro de incendio forestal durante el periodo 2006-2012, c) gradiente altitudinal de 3500 m a 3900 m snm y d) accesibilidad al sitio. De esta manera se seleccionaron 10 sitios (1 ha) en bosque denso, 10 en semidenso y 10 en fragmentado (Fig. 1).

Inventario forestal y de combustibles

En cada sitio de muestreo se instaló un área circular de 1000 m², en el cual se delimitaron tres sub-sitios de 3.5

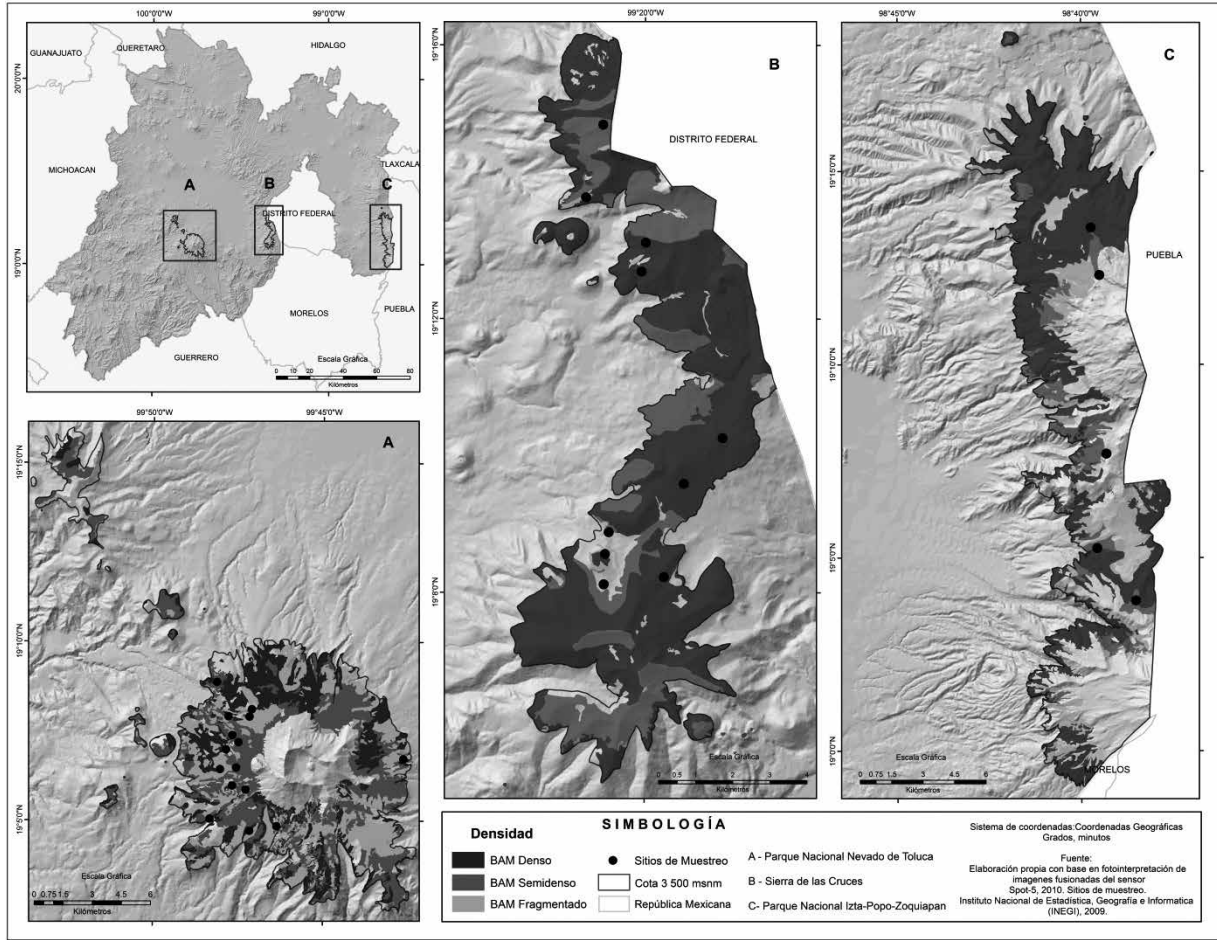


FIGURA 1. Área de estudio y localización de sitios de muestreo.

metros de radio cada uno, a una distancia de 8.9 metros. A partir del centro de cada sub-sitio se proyectaron tres líneas de 15 metros cada una, la primera siempre con dirección norte, azimut 0° y las otras dos a los 120° y 240° (Flores *et al.*, 2008) (Fig. 2).

Se registraron por sitio datos de ubicación y parámetros físicos como son: coordenadas, altitud, pendiente del terreno y exposición de ladera, utilizando un GPSMAP® 60CS y una brújula-clinómetro TANDEM SUUNTO.

Inventario forestal

Sobre el área del círculo mayor se inventariaron los árboles (> 2.5 cm de DAP). Se midió el diámetro a la altura de pecho (DAP), el diámetro de copa y se estimó la altura total de cada individuo utilizando un clinómetro digital (Endara, 2010).

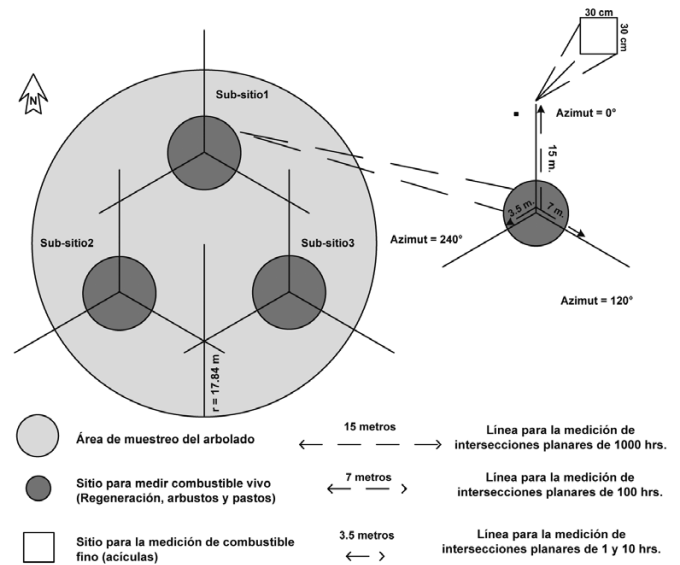


FIGURA 2. Diseño del sitio de muestreo (Flores *et al.*, 2008).



De igual manera, se contabilizaron y midieron todos los tocones con la finalidad de evaluar la cantidad de estos en sus diferentes clases diamétricas y evidenciar el aprovechamiento del bosque como actividad generadora de material combustible según las densidades de cobertura definidas del BAM.

Inventario de combustibles forestales

Para esta etapa se utilizó la metodología de Flores *et al.*, (2008), la cual tiene su base en la técnica de intersecciones planares (Brown, 1971; Brown *et al.*, 1982; Sánchez y Zerecero, 1983) en donde se contabiliza y clasifica al combustible por diámetro y tiempo de retardo.

En cada sub-sitio de 38 m² (Fig. 2), se inventariaron todos los árboles < 2.5 cm de DAP, así como la altura promedio de arbustos y pastos. En los tres transectos de cada sub-sitio se contabilizaron los combustibles dispuestos sobre el suelo por categorías de 1 h, 10 h, 100 h y 1000 h que interceptaban con el plano horizontal del transecto.

Para los combustibles de 1000 horas, se midió el diámetro de cada uno de ellos y se determinó si estaba en condición firme o podrido, entendiéndose esta última como la pérdida de la forma del tronco (Waddell, 2002).

En el extremo de cada transecto se colocó un cuadrante de 30 cm x 30 cm que sirvió para evaluar el porcentaje de cobertura del pasto y profundidad del combustible fino (acículas).

Las acículas fueron colectadas y llevadas a laboratorio en donde fueron separadas de materia orgánica y suelo e ingresadas en bolsas, previamente etiquetadas, a una estufa durante 24 horas con temperatura constante de 75 °C, para la obtención del peso seco del material (McRae *et al.*, 1979; Morfín *et al.*, 2012), este dato se incluyó en la contabilidad total de la carga de combustibles.

Procesamiento de datos

A partir de la medida del DAP y altura de todos los individuos inventariados se calculó el área basal (AB): $AB = \pi/4 * DAP^2$ y la biomasa forestal (B): $B = V * Db * FE$ en donde V= volumen (m³); Db= densidad básica de la madera (t/m³) y FE= factor de expansión de fustes (Brown y Lugo, 1984; Rojas y Villers,

2008). Para esta última, fue necesario calcular el volumen de madera con base en datos y ecuación convencional propuestos por Caballero (1982) y Grijpma (2001).

La densidad de individuos arbóreos en cada sitio de 1000 m², se determinó mediante la sumatoria de todos los individuos agrupados según clases diamétricas en intervalos de 5 cm ((2.5 a 7.4, 7.5-12.4, 12.5-17.4) cm, etc.) (Endara *et al.*, 2012) y su correspondiente AB. Lo anterior sirvió para evaluar y caracterizar los tipos de densidad de cobertura producto de la interpretación de imágenes de satélite.

Debido a la naturaleza de los datos de AB por clase diamétrica, se realizó una comparación entre las tres densidades mediante una prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica), ya que no cumplieron con la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk).

El porcentaje de extracción se obtuvo a partir del número de individuos en pie y tocones inventariados, agrupados por clase diamétrica y AB en cada tipo de densidad de cobertura.

La estructura vertical de cada condición (densa, semi-densa y fragmentada), se obtuvo identificando las diferencias significativas en altura, para el caso del sotobosque, se consideró la altura de los arbustos y pasto. Con los datos 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.

Estimación de carga de combustible forestal

Con base en el material interceptado por el transecto, según clase diamétrica o tiempo de retardo, se estimó la carga de combustibles, utilizando el Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales en el servidor web (SICCO) (Chávez *et al.*, 2011), en el que se obtuvo la carga combustible total y por categoría de cada uno de los tipos de densidad de cobertura, expresado en tha⁻¹ (Warren y Olsen, 1964; Van Wagner, 1968; Brown, 1971; Brown, 1974; Brown *et al.*, 1982; Sánchez y Zerecero, 1983).

Con la finalidad de identificar la influencia que tienen parámetros físicos con la cantidad de combustible, se rela-

cionaron los diámetros de copa, altitud, exposición de ladera y pendiente del terreno, con la carga combustible total y por tiempo de retardo, mediante métodos estadísticos de regresión lineal (Dobson, 1990; Villers *et al.*, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad arbórea

El BAM del Estado de México, tiene una superficie de 23 685 ha, de las cuales 12 994 ha corresponden al bosque denso, 6500 ha al bosque semidenso y 4191 ha al bosque fragmentado, distribuidos en el PNNT, SC y PNIZ-Pp-Z.

Los resultados de campo indican que en promedio el bosque denso tiene 387, el semidenso 347 y el fragmentado 261 individuos por hectárea, particularmente el promedio es de 29 m², 24 m² y 18 m² respectivamente (Tabla 1). La densidad arbórea promedio en todo el BAM es 332 individuos hectárea y un AB 24 m².

Existen diferencias significativas ($p= 0.0001$) entre la biomasa del bosque denso (723 t ha⁻¹) con respecto al semidenso (181 t ha⁻¹) y al fragmentado (132 t ha⁻¹) Sin embargo, la abundancia (número de individuos), dominancia (área basal) y la biomasa en las tres condiciones, varían de acuerdo con la ubicación altitudinal de las poblaciones y de la competencia por espacio y luz, (Aus-

TABLA 1. Datos estructurales en tres densidades del BAM.

Clase diamétrica	Cobertura								
	Denso			Semidenso			Fragmentado		
	No. Individuos	AB (m ²)	Biomasa (t ha ⁻¹)	No. Individuos	AB (m ²)	Biomasa (t ha ⁻¹)	No. Individuos	AB (m ²)	Biomasa (t ha ⁻¹)
5	163	0.28	0.7166	99	0.20	0.2366	54	0.12	0.1610
10	43	0.33	1.5336	52	0.37	0.6043	43	0.32	0.7644
15	21	0.33	2.0601	19	0.35	0.5473	22	0.39	1.0563
20	20	0.61	5.4490	22	0.69	2.5173	20	0.62	2.6271
25	8	0.38	4.2648	19	0.94	4.7554	26	1.28	7.4741
30	17	1.21	16.5694	30	2.14	14.0443	25	1.72	11.6430
35	14	1.37	21.9114	22	2.13	14.4074	14	1.35	10.2105
40	20	2.46	43.9772	20	2.49	20.4226	19	2.40	19.4185
45	16	2.51	50.7596	14	2.22	19.5815	16	2.45	17.7679
50	20	3.94	89.0920	24	4.60	36.7992	7	1.35	9.9222
55	13	3.05	75.2745	8	1.88	16.2363	1	0.24	2.1469
60	10	2.85	77.4539	12	3.40	29.7341	2	0.56	4.7642
65	4	1.30	37.6658	2	0.63	9.0586	0	0.00	0.0000
70	10	3.88	123.4076	2	0.72	3.1298	4	1.49	12.4159
75	2	0.86	14.3796	0	0.00	0.0000	3	1.28	10.7880
80	3	1.48	67.5565	1	0.50	4.3150	3	1.50	12.8052
85	1	0.55	21.0324	0	0.00	0.0000	1	0.54	4.1558
90	0	0.00	0.0000	1	0.64	4.8864	1	0.64	3.4492
95	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
100	2	1.56	69.9171	0	0.00	0.0000	0	0.00	0.0000
Σ	387	29	*723	347	24	181	261	18	132

* Valor indica diferencias significativas ($p = 0.0001$) entre coberturas



tin, 1990; Granados *et al.*, 2007), así como a las diversas perturbaciones a las que están sometidos estos bosques, tales como, incendios forestales, tala inmoderada y pastoreo, sobre todo en los bosques fragmentados (Endara, 2010; Castañeda, 2013).

Las actividades antrópicas contribuyen a la fragmentación del bosque. Con base en el inventario de árboles en pie para las distintas clases diamétricas, así como de los

tocones, se estimó que la extracción en el bosque denso es de 6% y en fragmentado de 29% (Tabla 2).

Los árboles con clases diamétricas entre 20 cm y 40 cm de DAP y en áreas en donde existe mayor accesibilidad, fueron las más afectadas, ya que como señala Endara (2010) esta extracción se utiliza para madera con fines comerciales.

La figura 3, muestra una reducción considerable del renuevo (plantas menores a 5 cm de DAP) en las tres condiciones de bosque, por lo que, sus procesos de regeneración se verán seriamente afectados (Benítez, 1988; Castro, 2003; Endara *et al.*, 2012), lo cual no garantiza que estos individuos alcancen la primera clase diamétrica. Asimismo se corroboró que el bosque fragmentado ya no cuenta con individuos de categorías diamétricas superiores a los 50 cm, esto debido a la extracción de los mismos, con fines comerciales o de saneamiento (Roig *et al.*, 1992; Endara, 2007).

Si bien, no existen diferencias significativas entre el número de individuos por hectárea y AB total entre las tres densidades ($p = 0.0957$), sí las hay entre clases diamétricas. El bosque fragmentado en la clase diamétrica 50 ($p = 0.020$), clase diamétrica 55 ($p = 0.043$) y clase diamétrica 60 ($p = 0.035$) alberga menos individuos con respecto al denso y semidenso, esto implica, una reducción en la capacidad reproductora del bosque, por la ausencia de árboles semilleros, así como un decremento del número de plántulas.

Estructura de la vegetación forestal

El análisis de la estructura de vegetación, da pauta para comprender la cantidad y calidad de los combustibles forestales en materia viva y muerta (Agee *et al.*, 1999).

El bosque de alta montaña denso (Fig. 4), semidenso (Fig. 5) y fragmentado (Fig. 6), está representado por tres estratos (Endara *et al.*, 2012), superior, intermedio e inferior, con diferencias significativas en altura ($p < 0.05$). Existen individuos que llegan a medir 25 m (≥ 75 cm DAP) en el dosel superior aún en altitudes mayores a 3500 m (Mendoza, 1977 y Benítez, 1988).

Los árboles en los bosques densos y semidensos alcanzan las mayores alturas promedio (Endara, 2007)

TABLA 2. Relación de arbolado vivo con tocones en tres densidades del BAM.

Clase diamétrica	Cobertura					
	Denso		Semidenso		Fragmentado	
	Vivos	Tocón	Vivos	Tocón	Vivos	Tocón
5	163	2	99	2	54	5
10	43	3	52	6	43	9
15	21	0	19	4	22	6
20	20	4	22	2	20	21
25	8	4	19	6	26	13
30	17	2	30	7	25	11
35	14	0	22	6	14	9
40	20	1	20	10	19	7
45	16	2	14	4	16	8
50	20	3	24	5	*7	8
55	13	0	8	1	*1	3
60	10	1	12	4	*2	4
65	4	0	2	0	0	2
70	10	0	2	1	4	0
75	2	0	0	0	3	2
80	3	1	1	0	3	0
85	1	0	0	1	1	0
90	0	1	1	0	1	0
95	0	0	0	0	0	0
100	2	0	0	0	0	0
Σ	387	24	347	59	261	108
% Extracción	6		15		29	

* Valor en $p < 0.05$ indican diferencias significativas entre coberturas.

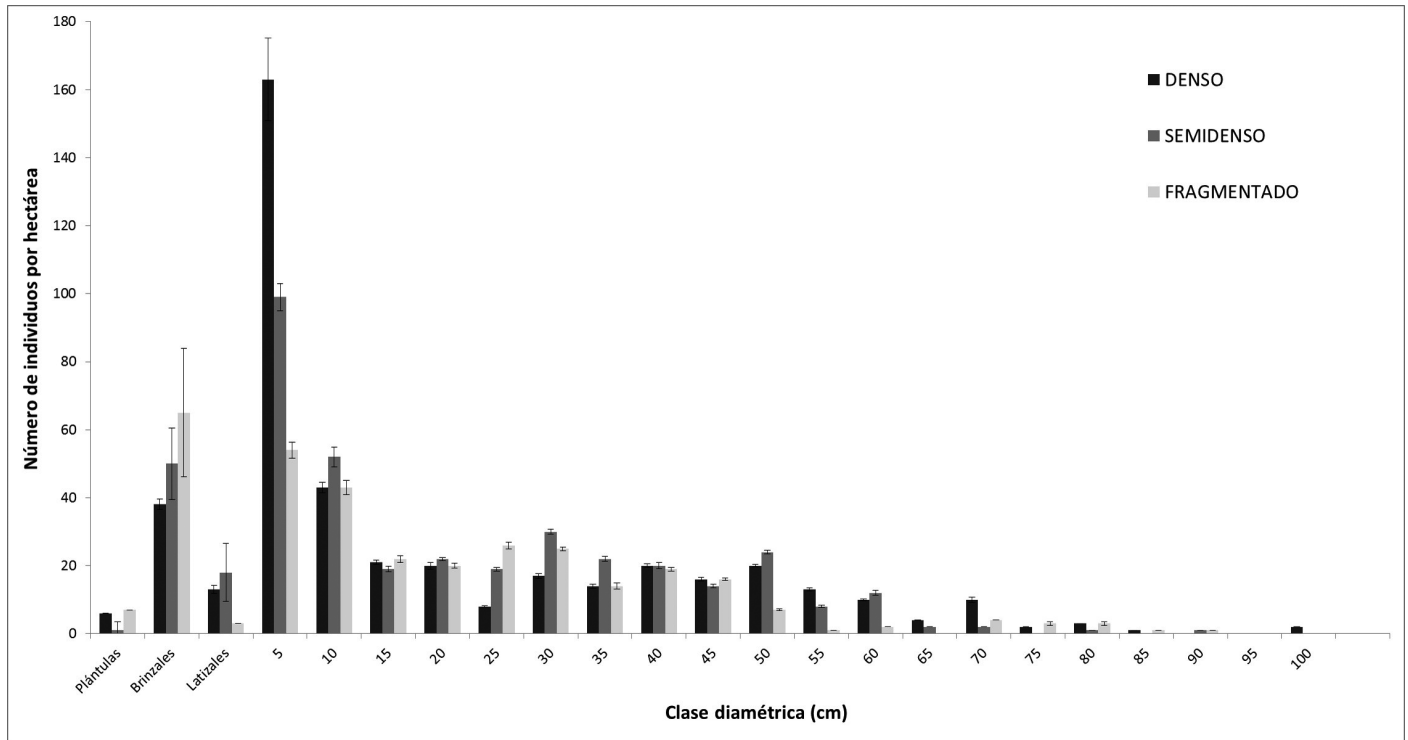


FIGURA 3. Número de individuos por clase diamétrica en tres densidades de cobertura de los bosques de alta montaña del Estado de México. Las líneas indican error estándar.

definido principalmente por el gradiente altitudinal y las propiedades de suelo (Sánchez-González y López-Mata, 2003); así como una actividad antrópica menos severa lo que permite tener individuos más altos y con mayor AB que el bosque fragmentado (Fig.6).

Combustible forestal muerto

La carga de combustibles muertos en los bosques estudiados varía según la densidad del bosque. El denso presentó 25 t ha⁻¹, el semidenso 24 t ha⁻¹ y el fragmentado 34 t ha⁻¹ (Tabla 3). Según Rothermel (1983), la carga total en un bosque aclareado o fuertemente aclareado con restos de poda, fluctúa entre 25 t ha⁻¹ y 30 t ha⁻¹; los bosques denso y semidenso estudiados se encuentran en el límite inferior o por debajo de este intervalo, sin embargo el bosque fragmentado supera el límite descrito.

Los combustibles de 1 hora en el bosque denso, presentan diferencias significativas con respecto a las otras densidades; comprobando en este caso, una relación posi-

TABLA 3. Carga de combustible, por tiempo de retardo y profundidad de hojarasca en tres densidades del BAM.

Categoría	Denso		Semidenso		Fragmentado		P
	t ha ⁻¹	D. E.	t ha ⁻¹	D. E.	t ha ⁻¹	D. E.	
1 hora	0.30*	0.14	0.16	0.12	0.21	0.05	0.0399*
10 horas	3.82	1.86	4.48	1.79	5.18	1.51	0.2313
100 horas	1.96	1.09	2.09	1.55	4.90*	2.86	0.0035*
1000 horas Firme	13.22	23.21	6.89	9.8	15.02	14.94	0.5357
1000 horas Podrido	4.96	7.22	9.43	13.16	7.88	13.54	0.6888
Hojarasca	0.87	0.53	0.91	0.37	0.83	0.52	0.9364
Total	25.13	28.68	23.95	16.83	33.81	25.99	0.6061
	Cm	D. E.	cm	D. E.	cm	D. E.	P
Hojarasca	1.53	0.9	1.97*	0.73	1.07	0.46	0.0331*

* Valores en p < 0.05 indican diferencias significativas entre coberturas. t ha⁻¹= Toneladas por hectárea, D.E. = Desviación estándar, cm = Centímetros.



FIGURA 4. Estructura vertical del bosque denso de alta montaña (3500 m - 3900 m).

Arbolado: A= Estrato superior, altura promedio 18 m. $AB > 7.1 \text{ m}^2$. B= Estrato intermedio, altura promedio 8 m. AB entre 0.3 m^2 y 0.6 m^2 . C= Estrato inferior, altura promedio 3 m. $AB < 0.3 \text{ m}^2$. Sotobosque: Arbustos, altura promedio 70 cm. Pastos, altura promedio 30 cm, cobertura $> 5000 \text{ mha}^{-1}$.

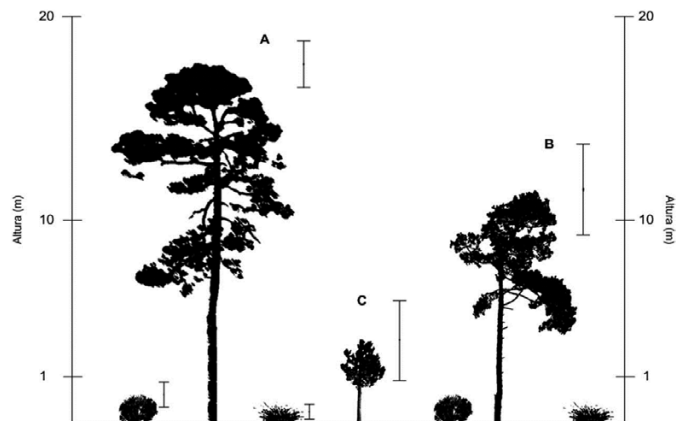


FIGURA 6. Estructura vertical del bosque fragmentado de alta montaña (3500 m - 3850 m).

A= Estrato superior, altura promedio 17 m. $AB > 1.7 \text{ m}^2$. B= Estrato intermedio, altura promedio 11 m. AB entre 0.3 m^2 y 1.2 m^2 . C= Estrato inferior, altura promedio 4 m. $AB < 0.3 \text{ m}^2$. Sotobosque: Arbustos altura promedio 70 cm. Pastos, altura promedio 25 cm, cobertura $> 5000 \text{ mha}^{-1}$.



FIGURA 5. Estructura vertical del bosque semidenso de alta montaña (3700 m - 3950 m).

A= Estrato superior, altura promedio 19 m. $AB > 4.6 \text{ m}^2$. B= Estrato intermedio, altura promedio 11 m. AB entre 0.3 m^2 y 2.5 m^2 . C= Estrato inferior, altura promedio 3 m. $AB < 0.3 \text{ m}^2$. Sotobosque: Pastos, altura promedio 50 cm, cobertura $> 5000 \text{ mha}^{-1}$.

tiva de la carga de combustibles finos ($\leq 0.6 \text{ cm}$ de diámetro) con la densidad del arbolado. Igualmente existen diferencias significativas entre los combustibles de 100 horas (2.5 cm a 7.5 cm de diámetro) en el bosque fragmentado con respecto al denso y semidenso.

Acciones como la extracción ilegal y los métodos de control fitosanitarios (Franco *et al.*, 2009) que incluyen: derribo y aprovechamiento o abandono, apilado y quemado; podas y aclareos, presentes en los bosques fragmentados, favorecen a la generación de combustibles no solo de 100 horas sino de 1000 horas (firmes y podridos) en comparación al bosque semidenso y denso, así como en la carga total de combustibles (Tabla 3).

Lo anterior, coincide con lo encontrado por Muñoz (2001), quien menciona una cantidad de combustibles leñosos semejante a la aquí señalada en las categorías de 10 horas a 1000 horas en bosques ubicados en áreas de extracción y aprovechamiento forestal.

La profundidad de la hojarasca en áreas fragmentadas es menor (Tabla 3), producto de las diversas perturbaciones a las que estos sitios están sometidos, como son los incendios y el pastoreo (Madrigal, 1992; Grumbine, 1994; Endara, 2010; Castañeda, 2013).

Se realizaron análisis de correlación entre la cantidad y clase de combustible con los parámetros físicos medidos en campo. Las relaciones más significativas encontradas fue que los combustibles gruesos de 1000 horas en condición firme ($p = 0.0490$) en los bosques densos se presentan

en pendientes de entre 7° y 12° (Tabla 4); Vélez (2009) señala que este atributo, favorece la continuidad horizontal y vertical de los combustibles.

En el bosque fragmentado, las áreas con pendiente del terreno que oscilen entre 5° y 15°, la cantidad de combustibles de 10 horas, será de entre 3.5 t ha⁻¹ y 6.5 t ha⁻¹ ($p = 0.0472$) y en sitios en donde la pendiente sea $\geq 18^\circ$ la cantidad de este combustible será menor a 2.5 t ha⁻¹.

En el caso del bosque semidenso, los combustibles de 1000 horas en condición firme mostraron relación con una exposición de ladera SW ($p = 0.0035$). Sin embargo este combustible (≥ 7.5 cm de diámetro) con orientación SW, no superó las 5 t ha⁻¹

Por lo tanto los sitios en donde se localizan los combustibles finos de 10 horas, se ven influenciados por el grado de pendiente del terreno, debido a que son combustibles con diámetros que no sobrepasan los 2.5 cm y son arrastrados por efecto de la gravedad o las escorrentías a zonas con pendientes menores como lo sugieren Villers y colaboradores (2012).

CONCLUSIONES

El uso de técnicas de interpretación visual de imágenes satelitales, utilizando Sistemas de Información Geográfica, para la identificación de coberturas vegetales densas, semidensas y fragmentadas fue pertinente, ya que apoyaron en gran medida la selección de sitios precisos para su posterior caracterización detallada, a través de inventarios forestales y de combustibles sobre el suelo, de una manera planificada y estructurada, generando información que coadyuva a las propuestas de acciones de prevención y combate de incendios forestales así como en la creación de un programa de Manejo Integral del Fuego (MIF) para la zona.

Análisis estadísticos generales, sobre el número de individuos y área basal entre las tres densidades, no arrojan diferencias significativas, pero análisis más precisos con valores de biomasa y cantidad de combustible para cada una de las tres categorías de cobertura, indican que el bosque fragmentado presentó valores superiores en cantidad total de combustibles y una menor cantidad de biomasa arbórea en comparación con el semidenso y denso.

En los bosques fragmentados las clases diamétricas 50 cm, 55 cm y 60 cm son casi inexistentes en comparación con las otras dos coberturas.

El estudio propone técnicas de análisis mixtas, desde la delimitación las densidades de cobertura definidas por interpretación de imagen satelital, hasta el conocimiento preciso de parámetros físicos y de las distintas categorías de combustibles en sitios predeterminados. La cantidad de combustible acumulado por categoría y su presencia según los estratos verticales de la vegetación, así como de las características del terreno, dan cuenta del posible comportamiento que el fuego puede tener ante un eventual siniestro (Villers Ruiz y López-Blanco 2004).

En particular, estudiar la carga de combustibles forestales categorizados por tamaño, resulta necesario para comprender el peligro que representan los combustibles y el comportamiento que tiene el fuego en los ecosistemas forestales (Villers-Ruiz *et al* 2006), por ejemplo, en el bosque denso se presenta una cantidad significativamente alta de combustibles finos (acículas y ramas delgadas) con diámetros menores a 0.6 cm, lo que propiciaría un incendio superficial y de rápido desplazamiento; por el contrario, en el bosque fragmentado, con una carga total mayor a 34 t ha⁻¹, con valores significativamente altos de combustibles de la categoría de 100 horas y presencia de 15.02 t ha⁻¹ de combustibles con diámetros mayores o iguales a 7.5 cm en condición firme, se prevé que se presentarían incendios mucho más severos.

La existencia del bosque fragmentado (coberturas < 50%) con grandes cantidades de combustibles medianos a gruesos, 10 h, 100 h y 1000 h, es producto de las actividades antrópicas desarrolladas en el rango altitudinal del bosque denso. En estas áreas más abiertas, los combustibles tienen grandes posibilidades de perder humedad más rápido (Wong y Villers 2007), donde el proceso de combustión ante la presencia del fuego, generará incendios intensos con mayor resistencia al control debido a la presencia de leños de gran calibre, en el cual el fuego pueden durar varias horas provocando efectos severos; por ello, es conveniente realizar un manejo adecuado de los combustibles, estableciendo acciones con el fin de reducir la acu-



mulación de material muerto, realizando presas con ramas acomodadas, extracción dirigida de leña, recolección y acomodo del material fuera del peligro, poda de ramas bajas y chaponeo. Dicho manejo, se sugiere realizar posterior a la aplicación de métodos de control fitosanitarios y principalmente en bosques fragmentados del Nevado de Toluca, en donde se tienen registros de un gran número de estas medidas fitosanitarias.

Los resultados expuestos en esta investigación sobre la carga de combustibles y las características topográficas del terreno, dan pauta para trabajos posteriores, enfocados a la elaboración de modelos espaciales que determinen la continuidad horizontal del combustible, mediante métodos geo-estadísticos (Chávez *et al.*, 2011).

Las quemas inducidas para favorecer el renuevo del pasto tienen un efecto directo sobre la regeneración del arbolado, en especial en los bosques fragmentados, donde la baja cantidad de brinzales y latizales no garantizan el paso a la siguiente categoría diamétrica, esto aunado a la carga combustible de estas zonas, hace de estos bosques altamente vulnerables a incendios forestales.

Las actividades del hombre y los factores ambientales como los meteorológicos, la topografía y los combustibles influyen en el comportamiento del fuego, El conocimiento de la carga de combustibles constituye una herramienta para orientar las tareas con el fin de prevenir incendios y de esta manera ayuden a la toma de decisiones en las tareas de prevención de incendios y en este caso con los datos recabados se podrían surgir algunas recomendaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos que compartieron su tiempo y experiencia para mejorar el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Agee, J., L. Bradshaw., S. Gutsell., E. Heyerdahl., R. Keane., K. Lertzman y K. McKelvey. 1999. Links among fire effects, fuels, and climate. *In*: D. Schmolt, D. Peterson, R. Keane, J. Lenihan, D. McKenzie, D. Weise y D. Sandberg. Assessing the effects of fire. Disturbance on ecosystems: A scientific agenda for research and management. Pacific Northwest Research Station. Portland Oregon. 104 p.
- Aguirre, O., J. Jiménez, H. Kramer y A. Akca. 2003. Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro de Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia UANL* 6(2):219-225.
- Alvarado, C. 1986. Comportamiento del fuego en rodales poco perturbados de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 113 p.
- Arnaldos, V., J. Navalón., E. Pastor., E. Planas y L. Zárate. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. 1a ed. Mundi Prensa. Madrid. España.
- Austin, P. 1990. Community theory and competition in vegetation. *In*: J.B. Grace y D. Tilman, eds. Perspectives on plant competition. Academic Press. Nueva York.
- Benítez, G. 1988. Efectos del fuego en la vegetación herbácea de un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en la Sierra del Ajusco. *In*: H. Rapoport, H. e I. López, eds. Aportes a la ecología urbana de la ciudad de México. MAB-Limusa. México, D.F. p:111-152.
- Brown, J. 1971. A planar intersect method for sampling fuel volume and surface area. *Forest Science* 17:96-102.
- Brown, J. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service. General technical report. EUA. 24 p.
- Brown, J., D. Oberheu y M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. Technical Report. United States Department of Agriculture y Forest Service. Ogden, EUA. 52 p.
- Brown, S. y A. Lugo. 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223(4642):1290-1293.
- Caballero, M. 1982. Empleo de coeficientes mórnicos en la elaboración de tablas de volúmenes de cedro rojo. Boletín Divulgativo No. 26 B. Abril 1982. 2ª ed. INIF-SARH. México. 27 p.
- Castañeda, M. 2013. Evaluación de zonas vulnerables a incendios forestales en bosques de alta montaña del Estado de México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. 91 p.

- Castro, U. 2003. Supervivencia de *Pinus hartwegii* Lindley en áreas incendiadas en el Ajusco, D.F. Tesis de licenciatura. Ingeniería forestal. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Edo. México. 54 p.
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2001. Incendios forestales. Serie fascículos.
- Chandler, C., P. Cheney., P. Thomas., L. Trabaud y D. Williams. 1983. Fire in the forestry, Forest fire behavior and effects. Vol. 1. John Wiley&Sons, Inc. EUA. 450p.
- 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. 73 p.
- Cordero, W., D. Rojas y N. Tito. 2002. Sistema de alerta temprana de incendios forestales (SATIF). Evaluación de incendios forestales Año 2001. Superintendencia Forestal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- Deeming, J. y J. Brown. 1975. Fuel models in the National Fire-Danger Rating System. *Journal of forestry* 73(6):347-350.
- Dobson, J. 1990. An introduction to generalized linear models. Chapman and Hall. 174 p.
- Encina J., F. Encina., E. Mata y J. Valdes. 2008. Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalimamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 83:13-24.
- 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 p.
- 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 p.
- 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(3):697-704.
- Endara, A., S. Franco., G. Nava., 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.
- Flores, J. y J. Benavides. 1994. Efecto de las quemadas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Terra* 12(4):393-400.
- Flores, J. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Disertación de doctorado. Department of Forest Sciences. Colorado State University. 201 p.
- 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. 47 p.
- Fosberg, M. 1970. Drying rates of heartwood below fiber saturation. *Forest Science* 16(1):57-63.
- Fragoso, P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez, México. 65 p.
- Franco, S., A. Endara., H. Regíl y G. Nava. 2009. Estudio fitosanitario forestal del Parque Nacional Nevado de Toluca. Instituto en Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. 76 p.
- 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* 61:38-57.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Ed. Offset Larios. 71 p.
- Granados, D., G. López y M. Hernández. 2007. Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 13(1):67-83.
- Grijpma, P. 2001. Producción forestal. Secretaría de Educación Pública-Trillas, 4ª reimpresión. México, D.F. 34 p.
- Grumbine, E. 1994. What is ecosystem management?. *Conservation Biology* 8(1):27-38.
- Lillesand, T. y R. Kiefer. 1994. Remote sensing and image interpretation. 3ª ed. Nueva York. 750 p.



- Lillo, M. y G. Consuelo. 2008. Aplicación de la Metodología de Fusión de Imágenes Multidirección-Multiresolución (MDMR) a la Estimación de la Turbidez en Lagos. *Información Tecnológica* 19(5):137-146.
- Louman, B., D. Quirós y M. Nilsson. 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 265 p.
- Madrigal, D. 1992. Ubicación y características generales del Estado de México en: Atlas Estado de México. Gobierno del Estado de México. Toluca, México. 85 p.
- McRae, J., E. Alexander y J. Stocks. 1979. Measurement and description of fuels and fire behavior on prescribed burns. A handbook. Canadian Forest Service. Ontario, Canada. 44 p.
- Mendoza, A. 1977. Datos meteorológicos de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, México. *Información Técnica de Bosques* 4(10):23-25.
- Morfin, J., E. Jardel y J. Michel. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México. 59 p.
- Muñoz, A. 2001. Elaboración de un modelo espacial de peligro de incendios forestales. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. 94 p.
- Nava, G., A. Endara., H. Regíl., C. Estrada., C. Arriaga y S. Franco. 2009. Atlas forestal del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales. Universidad Autónoma del Estado de México. 134 p.
- Orozco, S. 2008. Forest fire risk model for Michoacan, Mexico. Tesis de maestría. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, Países Bajos. 84 p.
- Ottmar, D., V. Sandberg., L. Riccardi y J. Prichard. 2007. An overview of the Fuel Characteristic Classification System-Quantifying, classifying, and creating fuel beds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research* 37:2383-2393.
- Probosque (Protectora de Bosques del Estado de México). 2012. Reporte de incendios. Estado de México, México. 54 p.
- Pyne, J., L. Andrews y R. Laven. 1996. Introduction to wildland fire. 2ª ed. JohnWiley&Sons, Inc. EUA. 769 p.
- 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. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. 137 p.
- Rodríguez-Trejo, 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. México. 171 p.
- Rodríguez-Trejo, D. 1996. Incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Multi-Prensa. México. 630 p.
- Rodríguez-Trejo, D. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindley. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2):145-15.
- Roig, A., J. Boninsegna y R. Holmes. 1992. Growth rates in diameter, basal area, and height of *Pilgerodendron uviferum*; relationship between growth index and germination. *Trees* 6:199-203.
- Rojas, F. y L. Villers. 2008. Estimación de la biomasa forestal en el Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales* 33(104):59-86.
- Rothermel, C. 1983. A mathematical model for fire spread predictions in Wildland fuels, USDA Forest Service. EUA. 50 p.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. 432 p.
- Sánchez, J. y G. Zerecero. 1983. Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Centro de Investigaciones Forestales del Norte. 15 p.
- Sánchez-González, A. y López-Mata, L. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica* 74 (1):47-71.
- Sandberg, D., R. Ottmar., J. Peterson y J. Core. 2002. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on air. Technical Report. Department of Agriculture, Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Ogden, EUA. 79 p.
- Sarukhán, J. y M. Franco. 1981. Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. SARH. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. México. 72 p.

- Seiler, W. y P. Crutzen. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climate Change* 2:207-247.
- Van Wagner, E., 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14 (1):20-26.
- Van Wagendonk, J. 2006. Fire as a physical process. In: Sugihara, G., J. Van Wagendonk., E. Shaffer., J. Fites-Kaufman y A. Thode, eds. *Fire in California's Ecosystems*. University of California, California. p:38-57.
- Veblen, T. 1992. Regeneration dynamics. In: Glenn-Lewin, D., R. Peet y T. Veblen, eds. *Plant Succession: Theory and Prediction*. Chapman & Hall. Londres p:152-187.
- Vélez, R. 2009. La defensa contra incendios forestales, fundamentos y experiencias. 2a ed. Mc Graw Hill. España. 840 p.
- Villers, L. y J. López. 2004. Comportamiento del fuego y evaluación de riesgos a incendios en áreas forestales de México: Un estudio en el volcán La Malinche. In: Villers, L. y J. López, eds. *Incendios forestales en México: Métodos de evaluación*. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM-CONACYT. México p:60-78.
- 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* 31:69-92.
- 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.
- 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.
- Villers, L., M. Castañeda y A. Endara. 2013. Alerta temprana a incendios forestales en México. 4o. Congreso Forestal Argentino Latinoamericano Iguazú, 2013.
- Villers, L., S. Villers y J. Wong. 2006. Fire hazard assessment at Malinche National Park, Central Mexico. 3rd International Fire Ecology Conference, San Diego, California. 3 p.
- Villers, S., L. Villers y J. López. 2012. Modelos que relacionan las características biofísicas del terreno con la presencia de combustibles forestales en las montañas centrales de México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 59:367-388.
- Waddell, K. 2002. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators* 1:139-153.
- Warren, G. y F. Olsen. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. *Forest Science* 10(3):267-276.
- Wong, J. y L. Villers. 2007. Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas* 62:87-103.

Manuscrito recibido el 12 de febrero de 2014.

Aceptado el 13 de noviembre de 2014.

Este documento se debe citar como:

Castañeda R., M.F., A.R. Endara A., M.L. Villers R. y E.G. Nava B. 2015. Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y Bosques* 21(2):45-58.