

Variación altitudinal de cargas de combustibles forestales en un bosque de Pino-Encino fragmentado en el Volcán Tacaná, México

Romeo de Jesús Barrios Calderón^{1,*} , José Germán Flores Garnica² , Juan Alberto Rodríguez Morales¹ , Jony Ramiro Torres Velázquez³ 

- (1) Facultad de Ciencias Agrícola. Universidad Autónoma de Chiapas. Entronque carretera costera y Huehuetán Pueblo, Huehuetán, Chiapas, México. C. P. 30660.
- (2) Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Av. Biodiversidad 2470, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. C. P. 47600.
- (3) Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui. Avenida Tecnológico Manzana 611, Bácum, Sonora. México. C. P. 85276.

Autor de correspondencia*: Romeo de Jesús Barrios Calderón [romeo.barrios@unach.mx]

> Recibido 17 el de octubre de 2023 - Aceptado el 01 de marzo de 2024

Cómo citar: Barrios Calderón, R. de J., Flores Garnica, J.G., Rodríguez Morales, J.A., Torres Velázquez, J.R. 2024. Variación altitudinal de cargas de combustibles forestales en un bosque de Pino-Encino fragmentado en el Volcán Tacaná, México. *Ecosistemas* 33(2): 2648. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2648>

Variación altitudinal de cargas de combustibles forestales en un bosque de Pino-Encino fragmentado en el Volcán Tacaná, México

Resumen: La acumulación de combustibles forestales en el piso de los bosques es un factor determinante en el riesgo de incendios, principalmente cuando están dispuestos en forma continua. Se cuantificó la carga de combustibles (tanto leñosos como hojarasca) aplicando la técnica de intersecciones planares en un gradiente que abarca entre 3145 y 3825 m en un bosque fragmentado de pino-encino en la Reserva de Biósfera Volcán Tacaná, Chiapas, México. Para ello, se establecieron cuatro sitios de estudio y en cada sitio se colocaron 20 transectos lineales; los combustibles leñosos fueron evaluados en diferentes intervalos de longitud de cada línea. La hojarasca se evaluó en cuadros de 1 m². Los resultados mostraron un aumento de las cargas de combustibles al incrementar la altitud, exceptuando la hojarasca que presentó una correlación negativa. Los sitios evaluados presentaron diferencias significativas en las cargas de combustibles leñosos, excepto para los combustibles de 10 h y 1000 h podridos, donde se observó mayor acumulación de combustibles totales a 3717 m de altitud (54.52 Mg ha⁻¹; p = 0.0088). Los combustibles de hojarasca presentaron mayor carga en el sitio de menor altitud (3145 m), con un total de 27.576 Mg ha⁻¹. La correlación entre la altitud y los combustibles de 1000 h fue baja. A excepción de la hojarasca, se rechaza la hipótesis planteada, ya que las cargas de combustibles aumentaron a medida que incrementó la altitud. Los resultados son de utilidad para definir estrategias de manejo de incendios forestales en la zona de estudio.

Palabras clave: gradiente altitudinal; hojarasca; incendios forestales; material leñoso caído; necromasa

Altitudinal variation of forest fuel loads in a fragmented Pine-Oak forest in the Tacaná Volcano, Mexico

Abstract: The accumulation of forest fuels on the forest floor is a determining factor in the risk of fires, mainly when they are arranged continuously. The fuel load (both woody and leaf litter) was quantified by applying the planar intersection technique in a gradient spanning between 3145 and 3825 m in a fragmented pine-oak forest in the Tacaná Volcano Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. For this purpose, four study sites were established and 20 linear transects were placed in each site; woody fuels were evaluated at different length intervals of each line. The litter was evaluated in squares of 1 m². The results showed an increase in fuel loads with increasing altitude, except for leaf litter, which presented a negative correlation. The evaluated sites presented significant differences in woody fuel loads, except for 10-h and 1000-h rotted fuels, where a greater accumulation of total fuels was observed at 3717 m altitude (54.52 Mg ha⁻¹; p = 0.0088). Leaf litter fuels had the highest load at the lowest altitude site (3145 m), with a total of 27.576 Mg ha⁻¹. The correlation between altitude and 1000 h fuels was low. With the exception of leaf litter, the proposed hypothesis is rejected, since fuel loads increased as altitude increased. The results are useful to define forest fire management strategies in the study area.

Keywords: altitudinal gradient; leaf litter; forest fires; fallen woody material; necromass

Introducción

Los incendios forestales desempeñan un papel muy importante en la dinámica de los ecosistemas (San Miguel-Ayanz et al. 2013), tomando en cuenta que estos inciden en la supervivencia y establecimiento de las plantas y ocurren de manera natural en los ecosistemas terrestres (Prichard et al. 2017). Se considera que el fuego es un elemento más de los ecosistemas forestales,

lo que sustenta el concepto moderno de “manejo del fuego”, donde se tiende a utilizar el fuego a baja intensidad y severidad para propiciar efectos positivos (p.e. favorecer la regeneración), reduciendo su dimensión y peligro (Rodríguez 2014). No obstante, los incendios también constituyen uno de los desastres naturales de mayor escala a nivel mundial (Reilly et al. 2018; Atroshenko et al. 2019), ocasionando la degradación y deforestación de bosques y selvas. Los regímenes de incendios (frecuencia, severidad, época del año, intensidad, tipo de incendios, extensión, etc.) se han alterado en las últimas décadas debido al continuo aumento de la temperatura a nivel global (IPCC 2013).

De acuerdo con esto, se busca tener cierto control en la presencia y recurrencia de incendios, lo cual está condicionado por la combinación de tres factores necesarios para que el fuego inicie y se propague (Chávez-Durán et al. 2016): i) un ambiente de ignición (temperatura, humedad y vientos), ii) una fuente de ignición (natural o antrópica) y iii) un agente de ignición (combustibles forestales). Éste último determina el comportamiento del fuego (Fidalgo-González et al. 2019), en función de la cantidad, densidad, grado de combustibilidad, estratificación y contenido de humedad (Yebra et al. 2005). De igual forma, la distribución y continuidad del material combustible pueden estar influenciados por la configuración del terreno (Fidalgo-González et al. 2019), en especial con respecto a la exposición, pendiente y altitud. Esta última, combinada con otros factores (p.e. uso del suelo, temperatura diurna, vegetación), permite determinar la ocurrencia de incendios forestales (Muñoz-Robles y Santana-Arias 2018), debido a que al aumentar la altitud se reduce la presión atmosférica y la temperatura, lo cual se conoce como gradiente térmico altitudinal (Serrada 2008). A su vez, se observa una reducción en la presión parcial de oxígeno y un aumento de la humedad relativa, lo cual propicia una disminución en la velocidad de combustión (Zhang et al. 2012). De esta forma, se puede generar una variación altitudinal de las cargas de combustibles forestales, que, a su vez, se asocia con una diferenciación en los regímenes de fuego (Blauw et al. 2017).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la cantidad de combustibles forestales a diferentes altitudes en un ecosistema forestal de pino-encino de alta montaña con indicios de fragmentación. Se buscó probar la hipótesis de que existe una correlación negativa entre la altitud y la carga de combustibles forestales, es decir, que a medida que incrementa la altitud, la carga de combustibles forestales disminuye. Esta hipótesis se fundamenta en que los bosques situados en zonas de mayor altitud se caracterizan por presentar menores temperaturas, donde la mitad del año se tienen heladas que limitan la disponibilidad de agua, reduciendo la productividad de combustibles. Esto ocurre a pesar de que, por las bajas temperaturas, se reduce la tasa de descomposición de los combustibles, lo que los mantiene en el terreno en un mayor período de tiempo.

Materiales y métodos

Área de estudio

Esta investigación se realizó en la Reserva de la Biosfera Volcán Tacaná (REBIVTA), Chiapas, localizada en la frontera sur de México, con una superficie de 6378.36 ha (DOF 2003) y cuya máxima altitud es de 4100 m. El dosel forestal dominante del bosque de pino-encino está constituido por *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus rudis* Endl., *Quercus benthamii* A. DC., *Quercus* sp. y *Juniperus standleyi* Steyererm. En algunas zonas se encuentra menor presencia de *Pinus pseudostrobus* Lindl. El estrato arbustivo es de baja densidad y se compone de especies como *Fuchsia paniculata* Lindl., *Lupinus montanus* H.B.K., *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex D.C. y *Stevia lucida* var. *oaxacana* D.C. Las hierbas más comunes son *Campelia zanonii* (L.) Sw., *Tagetes foetidissima* D.C. y *Bromus carinatus* Hook. & Arn. El relieve es montañoso y muy escarpado. El clima es templado húmedo con abundantes lluvias en verano C(m)(w), con registro de lluvias medias anuales de 1473 mm (SEMARNAT 2013).

Estrategia de muestreo y ubicación de sitios

Se ubicaron cuatro sitios de muestreo en un transecto altitudinal (3145, 3623, 3717 y 3825 msnm) en la ladera sur del volcán Tacaná, donde predomina el bosque de pino-encino (BPE) fragmentado (Fig. 1), considerando que las diferencias altitudinales definen variaciones en la vegetación, cobertura, edad, densidad y perturbación del arbolado. No se tomó en cuenta la presencia de disturbios previos debido a la falta de información disponible sobre los mismos. De esta manera, los sitios definidos fueron los siguientes: S1 Bosque encantado, S2 Cueva del oso, S3 El ombligo, S4 Cementerio de pinos.

La diferencia altitudinal entre los sitios S1 Bosque encantado y S2 Cueva del oso (cuatro veces mayor respecto a los demás sitios) se debe a la baja variación de especies asociadas en su intervalo. Por su parte, el sitio S4 Cementerio de pinos presenta condiciones de un pinar puro debido a su altitud, donde se encuentra el bosque del pino de las alturas, *Pinus hartwegii* Lindl.

Para la cuantificación de combustibles forestales, en cada sitio se delimitó una parcela cuadrada de 1 ha (Fig. 2) y se establecieron 20 líneas de muestreo (transectos) de 15 m en cada una de ellas.

Evaluación de combustibles leñosos

La medición se realizó aplicando la técnica de intersecciones planares descrita por Brown (1971), la cual se basa en cuantificar los combustibles leñosos que intersectan las líneas de muestreo. Se registraron de acuerdo con su tiempo de retardo (Fig. 2), es decir, el tiempo que el combustible tarda en perder dos tercios de su humedad para estar disponible a la ignición (Fosberg 1970; Pettinari y Chuvieco 2016): a) en 15 m, combustibles de 1000 h (diámetro > 7.5 cm); b) en 4 m, combustibles de 100 h (diámetro de 2.5 a 7.5 cm); c) en 1 m, combustibles de 10 h (diámetro de 0.61 a 2.5 cm) y de 1 h (diámetro de 0 a 0.6 cm). Con estos datos se calcularon los pesos de combustibles correspondientes empleando las fórmulas descritas por Sánchez y Zerecero (1983) (Tabla 1).

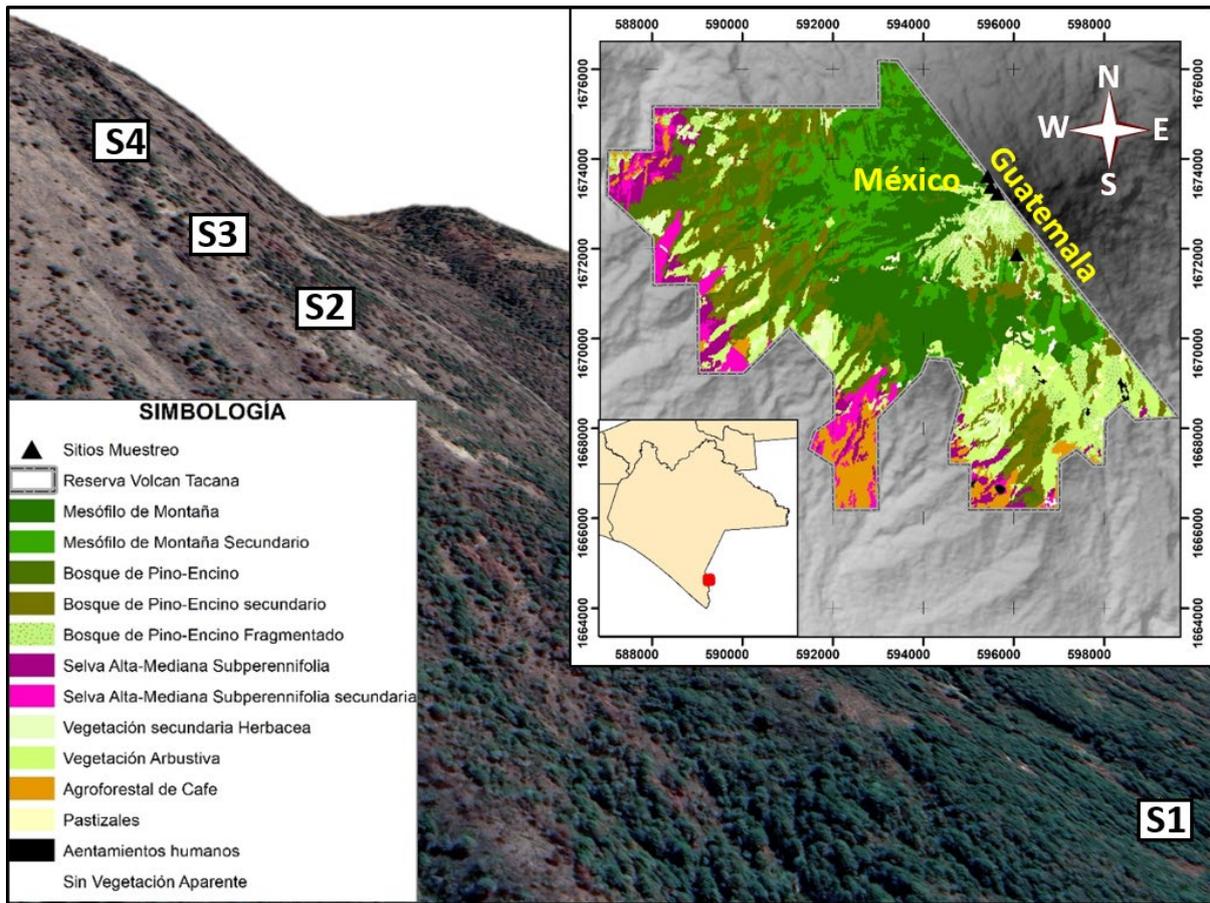


Figura 1. Localización del área de estudio y establecimiento de los sitios de muestreo a diferentes altitudes. S1: Bosque encantado (3145 msnm); S2: Cueva del oso (3623 msnm); S3: El ombligo (3717 msnm); S4: Cementerio de pinos (3825 msnm).

Figure 1. Location of the study area and establishment of sampling sites at different altitudes. S1: Bosque encantado (3145 msnm); S2: Cueva del oso (3623 msnm); S3: El ombligo (3717 msnm); S4: Cementerio de pinos (3825 msnm).

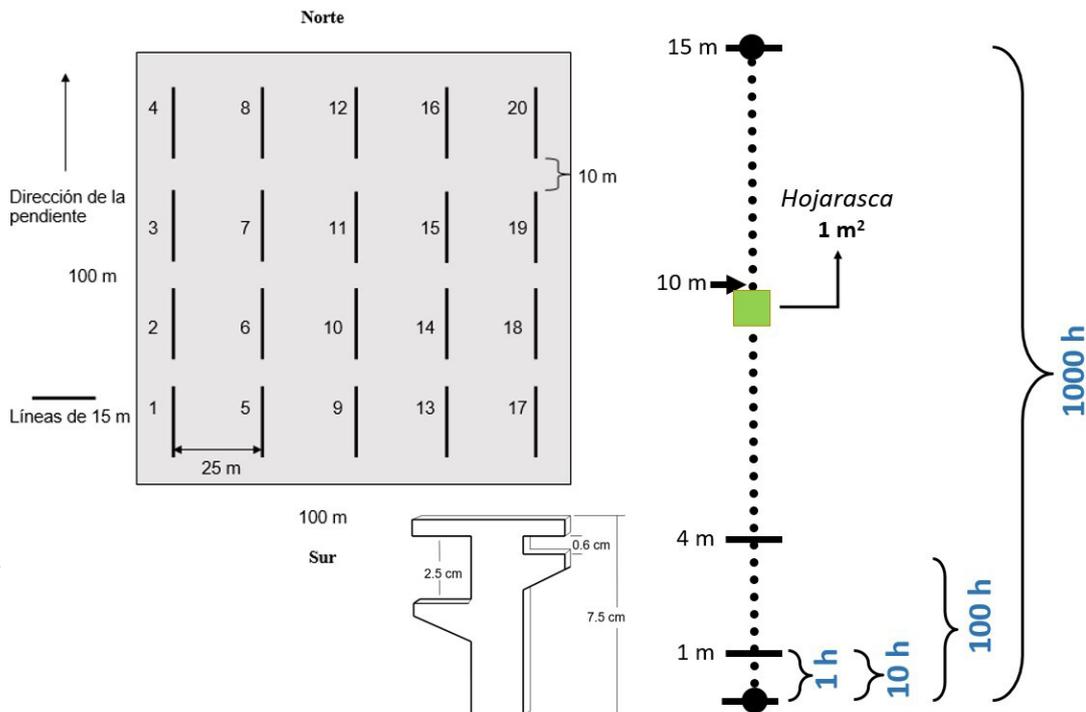


Figura 2. Esquema de muestreo y diseño de las líneas de intersección para la medición de combustibles leñosos y hojarasca.

Figure 2. Sampling scheme and design of intersection lines for measuring woody fuels and leaf litter.

Tabla 1. Cálculo del peso de combustibles leñosos (Brown 1971; Sánchez y Zerecero 1983).**Table 1.** Calculation of the weight of woody fuels (Brown 1971; Sánchez y Zerecero 1983).

Fórmula	Clase de combustible
$P = (0.484 * f * c)/(N * l)$	1 h
$P = (3.369 * f * c)/(N * l)$	10 h
$P = (36.808 * f * c)/(N * l)$	100 h
$P = (1.46 * d^2 * c)/(N * l)$	1000 h (firme)
$P = (1.21 * d^2 * c)/(N * l)$	1000 h (podrido)

Evaluación de combustibles de hojarasca

A diferencia de los combustibles leñosos, el combustible representado por la hojarasca superficial (hojas y acículas) y hojarasca en fermentación se evaluó a través de la colecta de muestras en cuadros de 1 m², ubicados a 10 m de cada transecto o línea de muestreo (Fig. 2) y considerando una sola capa de hojarasca (superficial y en fermentación). Se midió la profundidad de la hojarasca y se colectaron muestras únicamente en las líneas 5, 10, 15 y 20 de cada sitio (es decir, cuatro repeticiones por sitio). Las muestras fueron transportadas y secadas en laboratorio a una temperatura de 105 °C durante 24 h en una estufa de secado IKA OVEN 125 (IKA Works, Alemania) hasta obtener un peso seco constante, el cual fue referido a Mg ha⁻¹ con la siguiente ecuación:

$$CH = PSH * 0.01$$

donde CH representa la carga de hojarasca (Mg ha⁻¹), PSH el peso seco medio de la hojarasca (g) en 1 m², y 0.01 es el factor de conversión de g m⁻² a Mg ha⁻¹.

Análisis estadísticos

Con los valores de carga (Mg ha⁻¹) de combustibles leñosos y de hojarasca se determinó si existían diferencias estadísticas entre los sitios de muestreo a lo largo del transecto altitudinal. Para esto, se realizaron los análisis de varianza (ANOVA) correspondientes, con repeticiones aleatorizadas en cada sitio con un nivel de confianza de 95%, considerando una distribución normal de los datos. En caso de haber diferencia estadística, se procedió a realizar la prueba de Tukey ($\alpha < 0.05$), cuyos resultados se presentan en forma gráfica. Posteriormente, se realizó un análisis de regresión y correlación entre los gradientes altitudinales y las cargas de combustibles (leñosos y hojarasca) para definir los modelos que mejor representan dicha relación. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat versión 2008 (Di Rienzo et al. 2008).

Resultados

Combustibles leñosos

Combustibles de 1 h

Los resultados indican que el sitio S1 Bosque encantado, que se encuentra en la altitud más baja (3145 m), presentó la menor carga de combustibles de 1 h (0.089 Mg ha⁻¹) y mostró una diferencia estadística ($p = 0.0001$) con relación a los otros sitios. Los sitios S2 Cueva del oso, S3 El ombligo y S4 Cementerio de pinos no mostraron diferencias entre sí, presentando valores de 1.257, 1.131 y 0.737 Mg ha⁻¹, respectivamente (Fig. 3a).

Combustibles de 10 h

Respecto a los combustibles de 10 h, los sitios S2 Cueva del oso (3623 m) y S4 Cementerio de pinos (3825 m) reportaron la mayor cantidad de combustible, con un peso seco total de 6.181 y 6.089 Mg ha⁻¹, respectivamente. Sin embargo, no se presentan diferencias estadísticas ($p = 0.0639$) entre los cuatro sitios muestreados (Fig. 3b).

Combustibles de 100 h

En cuanto a los combustibles de 100 h, el sitio S4 Cementerio de pinos, que se encuentra en la máxima altitud evaluada, reportó la mayor cantidad de estos combustibles (11.087 Mg ha⁻¹), seguido del sitio S2 Cueva del oso (9.157 Mg ha⁻¹), aunque la diferencia entre estos sitios tampoco es significativa. Por otro lado, la menor carga de combustibles correspondió a los sitios S1 Bosque encantado y S3 El ombligo 1 (6.295 y 7.726 Mg ha⁻¹ respectivamente) (Fig. 3c).

Combustibles de 1000 h

Por su parte, los combustibles de 1000 h firmes reportan diferencias estadísticas ($p = 0.0029$) con respecto al sitio S3 El ombligo (3717 m) con una carga superior de $26.772 \text{ Mg ha}^{-1}$. No obstante, entre los otros tres sitios no se presentan diferencias, reportando las siguientes cargas: $18.279 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el sitio S4 Cementerio de pinos; $15.794 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el sitio S1 Bosque encantado y $14.919 \text{ Mg ha}^{-1}$ para el sitio S2 Cueva del oso (Fig. 3d). A diferencia de los combustibles de 1000 h firmes, los combustibles de 1000 h podridos no muestran diferencias entre los cuatro sitios de muestreo, con cargas de peso total que varían entre los 12.988 y $14.235 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Fig. 3e).

Total de combustibles leñosos

Se presentaron diferencias estadísticas entre sitios para las clases de combustibles leñosos de 1, 100 y 1000 h (firme). Las mayores cargas se presentaron en el sitio S3 El ombligo y sitio S4 Cementerio de pinos, siendo estos los de mayor altitud. Con relación a las cargas totales de combustibles leñosos, también se presentaron diferencias ($p = 0.0088$), donde el sitio S3 El ombligo reportó la mayor carga (54.52 Mg ha^{-1}), mientras que el sitio S1 Bosque encantado resultó ser el de menor carga total de combustibles leñosos (39.02 Mg ha^{-1}). Por su parte, los sitios S2 Cueva del oso y S4 Cementerio de pinos comparten similitudes con los sitios de mayor y menor carga (Fig. 3f). En general, se encontraron menores cargas de combustibles leñosos en la altitud más baja, mientras que a altitudes entre 3717 y 3825 m (sitios 3 y 4) se presentaron altas cargas en lo que respecta al material leñoso.

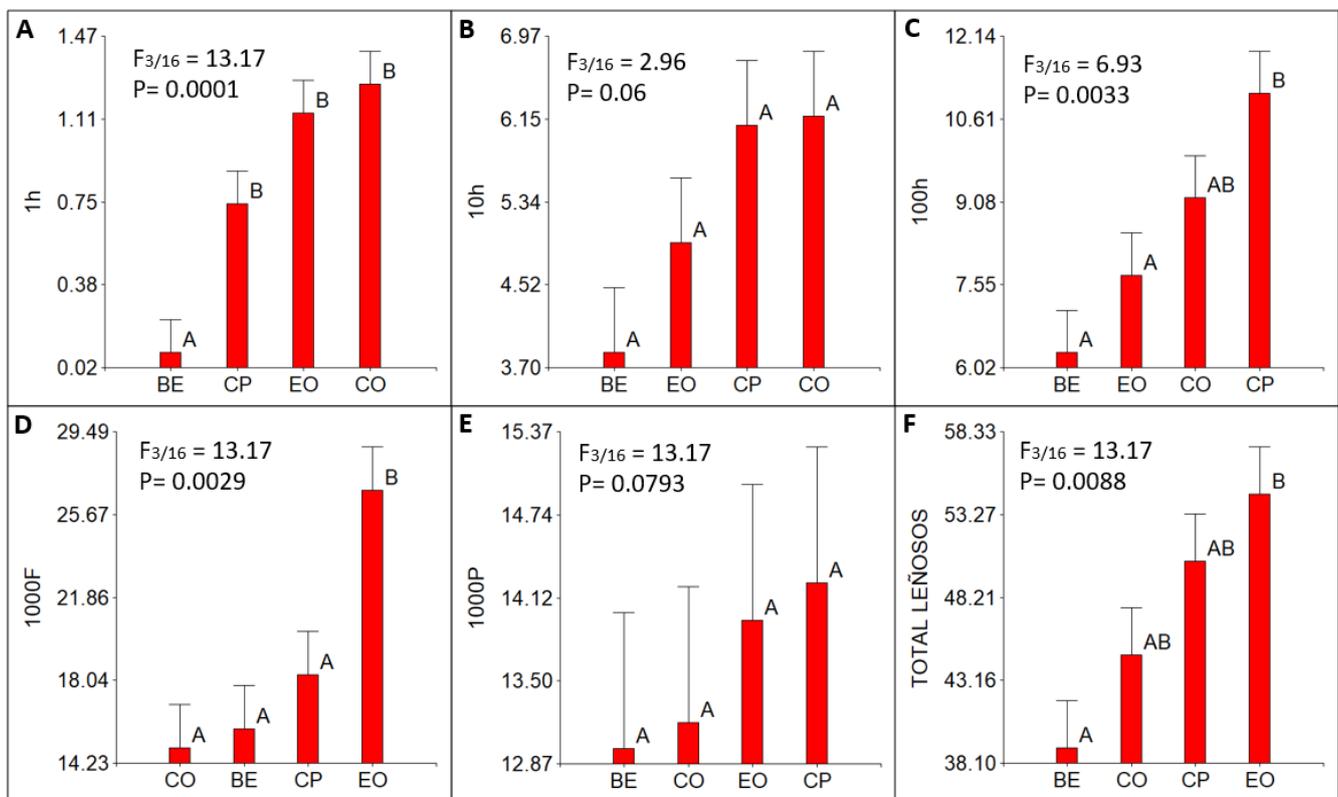


Figura 3. Análisis de varianza y comparación de medias entre los sitios evaluados para las clases de combustibles leñosos. A: 1 h; B: 10 h; C: 100 h; D: 1000F (firme); E: 1000P (podrido); F: total de combustibles leñosos. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0.05$).

Figure 3. Analysis of variance and comparison of means between the sites evaluated for the woody fuel classes. A: 1 hour; B: 10 hours; C: 100 hours; D: 1000F (firm); E: 1000P (rotten); F: total woody fuels. Different letters indicate statistical differences ($p < 0.05$).

Combustibles de hojarasca

Con respecto al combustible de hojarasca, el sitio S1 Bosque encantado, que se encuentra en la altitud más baja, reportó el mayor peso seco total ($27.576 \text{ Mg ha}^{-1}$), presentando diferencias ($p < 0.0001$) con relación a los otros sitios (Fig. 4a). Mientras tanto, los sitios S2 Cueva del oso, S3 El ombligo y S4 Cementerio de pinos no presentaron diferencias entre ellos, mostrando un peso seco total de 14.485 , 11.823 y $18.573 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente.

Carga de combustibles totales

Considerando tanto combustibles leñosos como hojarasca, los análisis estadísticos no presentaron diferencias ($p = 0.1841$) entre cargas a lo largo del transecto altitudinal de la ladera del volcán Tacaná, las cuales oscilaron entre 59.18 y 68.54 Mg ha^{-1} (Fig. 4b).

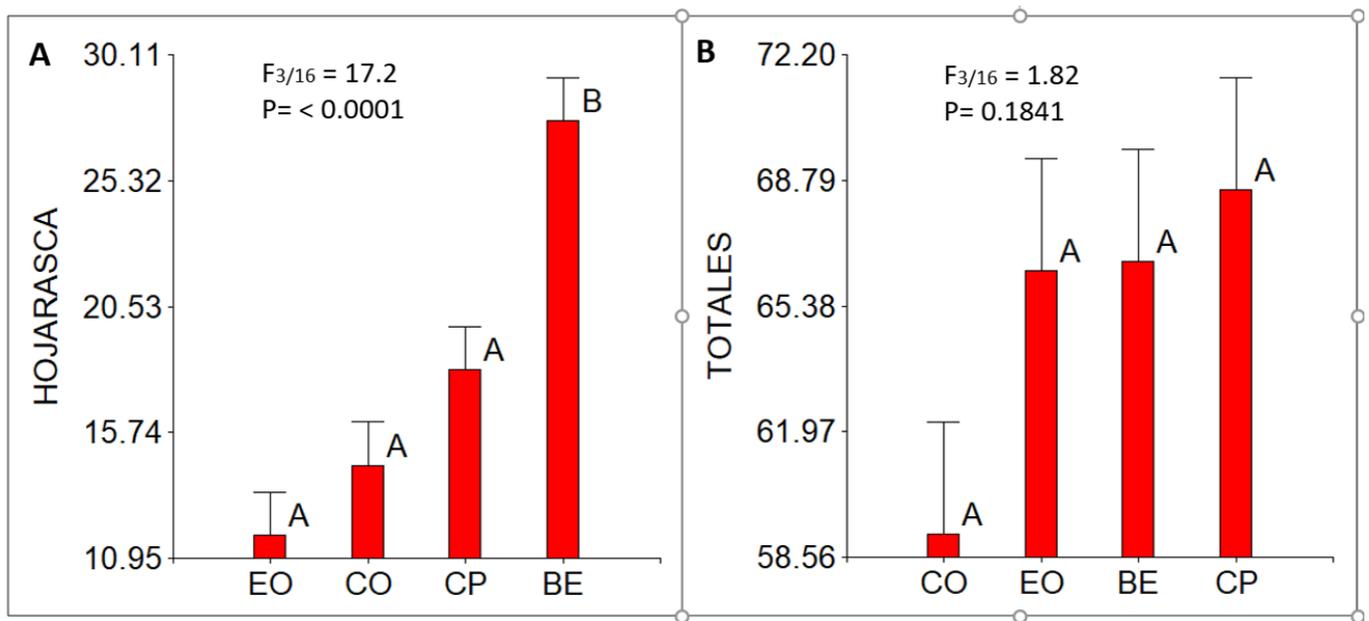


Figura 4. Análisis de varianza y comparación de medias entre los sitios evaluados para las clases de combustibles. A: hojarasca, B: combustibles totales (leñosos y hojarasca). Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0.05$).

Figure 4. Analysis of variance and comparison of means between the sites evaluated for the fuel classes. A: leaf litter, B: total fuels (woody and leaf litter). Different letters indicate statistical differences ($p < 0.05$).

Ajuste de modelos

Se definieron los modelos correspondientes para cada uno de los combustibles analizados (Tabla 2). El modelo exponencial presenta el mejor ajuste para los combustibles leñosos de 1 h ($R^2 = 0.802$), seguido por el modelo polinómico para los combustibles de 100 h ($R^2 = 0.736$). Por el contrario, los combustibles leñosos de 1000 h firmes definieron una correlación muy baja; no obstante, el modelo correspondiente podría usarse, con cierta precaución, en altitudes menores a 3600 m.

Tabla 2. Ajuste de modelos no lineales que definieron la regresión entre la carga de combustibles con respecto a la altitud.

Table 2. Adjustment of non-linear models that defined the regression between fuel load with respect to altitude.

Combustible	Modelo	Tipo	R ²
1h	$= 0.000001 * e^{0.0037 * A}$	Exponencial	0.802
10h	$= 0.0000001 * A^{2.177}$	Potencial	0.729
100h	$= (0.00001 * A^2) - (0.0697 * A) + 117.93$	Polinómica	0.736
1000F	$= 4.4493 * e^{0.0004 * A}$	Exponencial	0.205
1000P	$= 8.7249 * e^{0.0001 * A}$	Exponencial	0.710
Hojarasca	$y = -65.05 * \ln(A) + 550.22$	Logarítmica	0.674

Correlación de combustibles con variación altitudinal

La carga de combustibles leñosos acumulados en el suelo aumenta conforme incrementa la altitud. Por el contrario, la carga de los combustibles representados por la hojarasca muestra una tendencia negativa con la altitud, es decir, las cargas de combustibles en el suelo forestal tienden a disminuir al incrementar la altitud (Fig. 5).

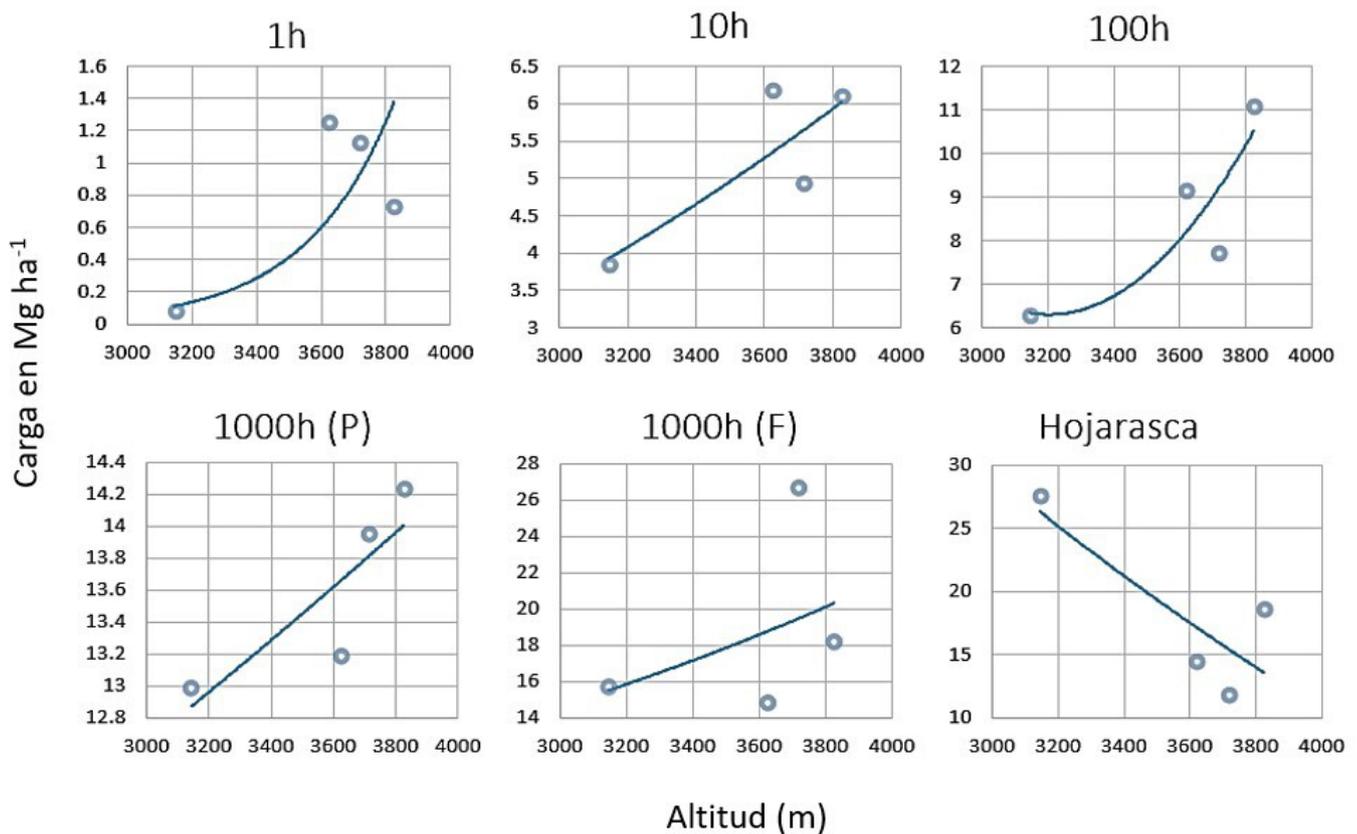


Figura 5. Correlación entre los gradientes altitudinales con respecto a las cargas de combustibles muertos (leñosos y hojarasca).

Figure 5. Correlation between altitudinal gradients with respect to dead fuel loads (woody and leaf litter).

Discusión

Combustibles leñosos

Los combustibles finos de 1 h presentaron la menor carga en el sitio S1 Bosque encantado (el de menor altitud, a 3145 m), lo cual resultó muy similar a lo reportado en un bosque de pino-encino en Coahuila, México (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011) con cargas de 0.04 a 0.09 Mg ha⁻¹, en un gradiente altitudinal de 1590 a 3100 m. De igual forma, en otro estudio se reportan cargas de 0.74 Mg ha⁻¹ a una altitud de 1890 m (Rubio-Camacho et al. 2016), valor muy similar a lo obtenido en el sitio S4 Cementerio de pinos (3825 m), que tiene mayor altitud.

Se esperaba que, en este estudio, al aumentar la altitud, los combustibles de 1 h reportaran cargas más bajas como las registradas por Xelhuantzi-Carmona et al. (2011), que encontraron a cargas de combustibles muy bajas (de 0.01 a 0.03 Mg ha⁻¹) a una altitud de 3600 msnm en un bosque de pino-encino en Puebla, México. También se esperaba que, a menores altitudes, se registraran mayores cargas de combustibles como las obtenidas por Hood et al. (2017) que reportaron 1.3 Mg ha⁻¹ en un bosque de pino a una altitud de 2880 m, muy similar a lo encontrado en los sitios S2 Cueva del oso y S3 El ombligo, aunque a mayores altitudes (3623 y 3717 m, respectivamente). Esto muestra que a mayor altitud en el área de estudio se tienen altas acumulaciones de combustibles para esta categoría. En altitudes similares a las del sitio 2 y 3, se han evaluado cargas mayores en bosques de encino-pino, en un rango de 3.8 Mg ha⁻¹ (entre 2300 y 4461 m) y 4.5 Mg ha⁻¹ (2440 m) (Calleja-Peláez et al. 2020). Lo anterior implica que la presencia de encinares favorece la acumulación de combustibles de 1 h dentro de la asociación pino-encino.

Los resultados obtenidos para los combustibles de 10 h coinciden con lo reportado para un bosque de pino-encino evaluado por Rubio-Camacho et al. (2016) quienes encontraron un promedio de 6.81 Mg ha⁻¹, pero a altitudes menores (1200–1890 m). De igual forma, otros estudios en bosques de pino reportan cargas superiores (de hasta 12.8 Mg ha⁻¹) en altitudes entre 2661 y 2955 m (Collins et al. 2012). Específicamente, en un gradiente altitudinal parecido (3500 a 4200 m) al de los sitios 2 y 4 del presente estudio en la REBIVTA, en un bosque de *Pinus hartwegii*, Castañeda-Rojas et al. (2015) cuantificaron 3.82, 4.48 y 5.18 Mg ha⁻¹, considerando tres coberturas (densa, semidensa y fragmentada). La tendencia altitudinal de las cargas de combustibles del presente estudio solo coincide con lo reportado por Castañeda-Rojas et al. (2015) para el tipo de cobertura fragmentada. Esto posiblemente esté influenciado por la baja densidad arbórea y la influencia de *Pinus hartwegii* que incide directamente en la concentración de combustibles leñosos de esta categoría, con la caída de ramas y ramillas acumuladas en el piso forestal.

Las cargas de combustibles leñosos de 100 h obtenidas en este estudio variaron de 6.3 a 11.09 Mg ha⁻¹, valores mucho mayores a los reportados en otros estudios con altitudes similares (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011; Chávez-Durán et al. 2016; Quintero-Gradilla et al. 2019; Calleja-Peláez et al. 2020; Coates et al. 2020). Específicamente, a una altitud de 3600 m (vegetación pino-encino) se reportan cargas entre 0.05 y 0.28 Mg ha⁻¹ (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011), mientras que, en el presente estudio,

a una altitud similar (3623 m), se obtuvieron 9.16 Mg ha⁻¹. Por el contrario, se han reportado cargas superiores de entre 14.7 y 46.54 Mg ha⁻¹, en bosques de pino con altos niveles de conservación o sin presencia de incendios (Collins et al. 2012; Rubio-Camacho et al. 2016; Hood et al. 2017). Por otra parte, la menor carga de combustibles en esta investigación (6.29 Mg ha⁻¹) correspondió al sitio S1 Bosque encantado (3145 m), valor similar a los 6 Mg ha⁻¹ reportadas por Hood et al. (2017), pero a menor altitud (2690 a 2880 m).

Coincidiendo con otros estudios (Castañeda-Rojas et al. 2015; Quintero-Gradilla et al. 2019), los combustibles de 1000 h aportan la mayor proporción de la carga de combustibles totales: a) firmes, entre 26.77 y 14.92 Mg ha⁻¹; y b) podridos, entre 12 y 14 Mg ha⁻¹. En particular, los combustibles de 1000 h firmes representan las mayores cargas. No obstante, aunque no se indica la altitud, se tienen reportes de cargas de combustibles de 1000 h de hasta 79.5 Mg ha⁻¹ en un bosque de *Pinus douglasiana* (Quintero-Gradilla et al. 2019) que puede ser atribuido a una alta perturbación, aprovechamientos madereros, densidad de arbolado irregular o a la baja incidencia de incendios. Por el contrario, se tienen cargas de 0 a 0.28 Mg ha⁻¹ de estos combustibles en bosques de pino-encino (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011), considerados como cargas muy bajas.

En ecosistemas templados, como el área de estudio, existe una gran variabilidad en las cargas de combustibles leñosos (16 a 65 Mg ha⁻¹) (Stephens y Moghaddas 2005; Kane et al. 2009; Reiner et al. 2009; Castañeda-Rojas et al. 2015; Rubio-Camacho et al. 2016). La carga promedio de combustibles leñosos en los sitios de la presente investigación varía de 39.02 a 54.52 Mg ha⁻¹, por lo que se encuentra dentro de este rango. No obstante, es importante señalar que estos combustibles pueden variar considerablemente (Vander Yacht et al. 2019), pudiéndose encontrar cargas menores, como las 15.84–18.31 Mg ha⁻¹ en bosque de pino-encino (Rubio-Camacho et al. 2016), o de 0.15 Mg ha⁻¹ a 22.64 Mg ha⁻¹ en bosque de pino (Aguilar-Arias et al. 2012).

Combustibles de hojarasca

Algunos estudios realizados en un bosque de pino y de pino-encino reportan cargas de hojarasca menores a las obtenidas en el presente estudio: 2.9 Mg ha⁻¹ (Rodríguez 2014); 2.81 Mg ha⁻¹ (Hernández-García et al. 2016); 8.52 Mg ha⁻¹ (Rubio-Camacho et al. 2016); 7.28 Mg ha⁻¹ (Calleja-Peláez et al. 2020). En referencia a la altitud, a 1075 m, Rodríguez (2014) también reporta cargas de 11.24 Mg ha⁻¹ en un bosque de pino, similar a lo evaluado en el sitio S3 El ombligo, aunque a 3717 m. De igual forma, en otro bosque de pino se reportan cargas de hojarasca en un gradiente altitudinal de 2690 a 2880 m, bajo tres condiciones: sin tratamiento (26.6 Mg ha⁻¹); con retención de biomasa (27.4 Mg ha⁻¹); y con remoción de biomasa (26.8 Mg ha⁻¹) (Hood et al. 2017), valores similares a la carga de hojarasca máxima evaluada en el presente estudio correspondiente al sitio S1 Bosque encantado (27.576 Mg ha⁻¹), aunque a 3145 m. Sin embargo, se reporta una gran variación en las cargas de hojarasca en bosque de pino, que van desde 1.70 hasta 20.10 Mg ha⁻¹ (Aguilar-Arias et al. 2012), cuyo valor máximo es similar al evaluado en el sitio S4 Cementerio de pinos. Contrario a lo encontrado en este estudio, se tienen reportes que las cargas de hojarasca incrementan al aumentar la altitud (Hood et al. 2017). Sin embargo, en general, se ha encontrado que la altitud no influye en la carga media de hojarasca (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011; Castañeda-Rojas et al. 2015; Rubio-Camacho et al. 2016; Hood et al. 2017; Calleja-Peláez et al. 2020; Coates et al. 2020), a pesar de ser diferentes las condiciones a las del área estudiada.

Carga total de combustibles forestales (leñosos y hojarasca)

Respecto a la carga total de combustibles muertos (leñosos y hojarasca) se encontró que, en general, el rango de las cargas evaluadas en la REBIVTA (59.18–68.54 Mg ha⁻¹) es mayor a lo reportado en otros estudios. Para un bosque de pino-encino se reporta una media de 17.90 Mg ha⁻¹ (Xelhuantzi-Carmona et al. 2011), mientras que para un bosque de pino se reportan 11.07 Mg ha⁻¹ (Hernández-García et al. 2016). No obstante, algunos estudios reportan cargas de hasta 36 Mg ha⁻¹, consideradas dentro de un rango normal para los bosques de pino-encino (Rubio-Camacho et al. 2016; Calleja-Peláez et al. 2020), valores menores con relación a la carga total de combustibles muertos registrada en este estudio.

Variación altitudinal de combustibles forestales

La variación altitudinal de las cargas de combustibles forestales en la REBIVTA mostró, en general, una correlación positiva, lo cual puede deberse a condiciones específicas de la vegetación, que a su vez está influenciada por las condiciones definidas por la altitud (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc.). De esta forma, la mayor acumulación de combustibles leñosos se presentó a 3717 m (S3 El ombligo), donde se tiene vegetación más vieja, una mayor densidad de sotobosque y fuertes vientos (Castañeda-Rojas et al. 2015). Por otro lado, el sitio S4 Cementerio de pinos, el cual se encuentra a mayor altitud (3825 m), presenta rodales en diferentes etapas sucesionales (señiles, maduros y juveniles), lo cual podría limitar el desprendimiento de ramas y elementos del arbolado que generen menor cantidad de material leñoso con respecto al sitio S3 El ombligo. De igual forma, el sitio S1 Bosque encantado (3145 m) presentó la mayor acumulación de hojarasca, lo cual puede deberse que a esa altitud se presenta alta densidad de arbolado, mayor mezcla de especies (Cueva et al. 2019) y una mayor asociación de pinos y encinos.

Como se ha reportado en otros estudios, es evidente la influencia de la variación altitudinal con respecto a la estructura, diversidad y biomasa del bosque (Cueva et al. 2019). Se debe considerar que la elevación también afecta el secado estacional de los combustibles forestales, que en elevaciones bajas llegan a secarse más rápido (altas temperaturas y menor precipitación), mientras que en elevaciones altas tardan más debido a que la temperatura disminuye y la precipitación aumenta (Villers 2006). Es importante señalar que, en las zonas muy altas de más de 3500 m, la humedad no siempre estará disponible para los árboles, afectando su crecimiento y la acumulación de materiales leñosos debido a la posibilidad de heladas o congelamientos que detienen la migración de humedad.

Aunque a mayor altitud la carga de combustibles tiende a aumentar (Rodríguez-Trejo et al. 2011), hasta cierto límite, su disponibilidad es menor, debido a un mayor número de días lluviosos. Castañeda-Rojas et al. (2015), con relación a la cantidad de combustibles en áreas montañosas, definen que, en las zonas de mayor altitud, la carga de combustibles disminuye. Sin embargo, para el área de estudio se deben considerar otros factores, como la ocurrencia de incendios en años recientes

(SEMARNAT 2013), específicamente en los sitios S1 Bosque encantado y S2 Cueva del oso, lo cual puede asociarse a una reducción de combustibles muertos.

En términos generales, los árboles tienen un menor desarrollo a mayores altitudes, obedeciendo a un gradiente clinal, por lo cual se esperaba que, a mayores altitudes, la acumulación de materiales leñosos sería menor (asumiendo que en todos los puntos comparados se presente un historial de incendios similar). De esta forma, la zonificación de vulnerabilidad por incendios en zonas montañosas varía altitudinalmente (Castañeda-Rojas et al. 2015): i) en el tercio inferior se espera gran resistencia al control, debido a que las temperaturas son más altas; ii) en el tercio medio disminuye la resistencia al control, debido a una menor disponibilidad de combustible a pesar de generarse un cinturón térmico durante la noche, caracterizado por una temperatura promedio más alta y humedad más baja, lo que representa un índice de peligro mayor; y iii) en el tercio superior se presentan cambios bruscos de vientos, con interacciones entre los vientos locales y generales, propiciando la formación de remolinos. Sin embargo, al existir menor cantidad de combustible, se reduce la propagación del fuego. Por ello, la variación del peligro de incendios dependerá en gran medida de la combinación de factores topográficos, del relieve (altitud), orientación y la hora del día (Rodríguez-Trejo et al. 2011).

Además, se deben considerar la vegetación arbustiva y herbácea que, aunque no acumulan mucho material, también representan una fuente importante de combustible. Por otra parte, se debe tomar en cuenta, en futuros estudios, que la variación altitudinal de las cargas de combustible puede estar asociada a los antecedentes de ocurrencia de incendios forestales, plagas y aprovechamiento. Por ejemplo, la presencia de incendios (no recurrentes) en las zonas de menor altitud ha incidido en la disminución de la carga de combustibles leñosos, a excepción de los combustibles de hojarasca, que tienen mayor productividad.

Conclusiones

Al presentarse una correlación positiva de las cargas de combustible con respecto a la altitud, se rechaza la hipótesis inicialmente planteada. En el bosque de pino-encino del Volcán Tacaná, la carga de combustibles forestales no disminuye conforme aumenta la altitud, donde las cargas mayores de combustible correspondieron a las mayores altitudes. Esto puede asociarse a las variaciones en las condiciones de la vegetación (especies, densidad, distribución, etc.) definidas por condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, lluvias, vientos, etc.) propiciadas por la transición altitudinal.

Contribución de los autores

Romeo de Jesús Barrios-Calderón: Conceptualización, Investigación, Metodología, Redacción -borrador original. José Germán Flores-Garnica: Metodología, Análisis formal, Redacción – revisión y edición. Juan Alberto Rodríguez-Morales: Administración del proyecto, supervisión, validación. Jony Ramiro Torres Velázquez: Recursos, Visualización, Redacción – revisión y edición.

Agradecimientos

Al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) que administra la Reserva de la Biósfera Volcán Tacaná y a la comunidad de Chiquihuites del municipio Unión Juárez, Chiapas, por las facilidades otorgadas y el apoyo brindado para la realización del trabajo de campo. A la Universidad Autónoma de Chiapas por el respaldo y acompañamiento para la ejecución de este trabajo.

Referencias

- Aguilar-Arias, H., Ortiz-Malavasi, E., Vilchez-Alvarado, B., Chazdon, R.L. 2012. Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 9(22): 22-31. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.360>
- Atroshenko, Y.K., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., Volkov, R.S. 2019. Protective lines for suppressing the combustion front of forest fuels: experimental research. *Process Safety and Environmental Protection* 131: 73-88. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.09.006>
- Blauw, L.G., van Logtestijn, S.P., Boreekman, R., Aerts, R.J., Cornelissen, J.H.C. 2017. Tree species identity in high-latitude forests determines fire spread through fuel ladders from branches to soil and vice versa. *Journal of Forest Ecology and Management* 400: 475-484. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.023>
- Brown, J. 1971. A planar intersect method for sampling fuel volume and surface area. *Forest Science* 17(1): 96-102.
- Calleja-Peláez, B., López-López, B., Méndez-González, J., Ríos-Camey, J.M., Gutiérrez-Merino, E. 2020. Tamaño de muestra para estimar cargas de combustible en bosque de encino en la región Montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(57): 174-195. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.617>
- Castañeda-Rojas, M.F., Endara-Agramont, A.R., Villers-Ruiz, M de L., Nava-Bernal, E.G. 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. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.212444>
- Chávez-Durán, A.A., Xelhuantzi-Carmona, J., Rubio-Camacho, E.A., Villanueva-Díaz, J., Flores-López, H.E., De la Mora-Orozco, C. 2016. Caracterización de cargas de combustibles forestales para el manejo de reservorios de carbono y la contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 2589-2600. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.485>
- Coates, T.A., Johnson, A., Aust, W.M., Hagan, D.L., Chow, A.T., Trettin, C. 2020. Forest composition, fuel loading, and soil chemistry resulting from 50 years of forest management and natural disturbance in two southeastern Coastal Plain watersheds, USA. *Forest Ecology and Management* 473: 118337. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118337>
- Collins, B.J., Rhoades, C.C., Battaglia, M.A., Hubbard, R.M. 2012. The effects of bark beetle outbreaks on forest development, fuel loads and potential fire behavior in salvage logged and untreated lodgepole pine forests. *Forest Ecology and Management* 284: 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.027>

- Cueva, E., Lozano, D., Yaguana, C. 2019. Efecto de la gradiente altitudinal sobre la composición florística, estructura y biomasa arbórea del bosque seco andino, Loja, Ecuador. *Bosque* 40(3): 365–378. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000300365>
- DOF 2003. Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, se ubica en los municipios de Tapachula, Cacahoatán y Unión Juárez, en el estado de Chiapas, con una superficie total de 6,378-36- 95.86 hectáreas. *Diario oficial de la Federación*. 28/01/2003. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=706332&fecha=28/01/2003#gsc.tab=0
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2008. InfoStat. *Software Estadístico. Manual del usuario*. Versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=34>.
- Fidalgo-González, L.A., Arellano-Pérez, S., Álvarez-González, J.G., Castedo-Dorado, F., Ruiz-González, A.D., González-Ferreiro, E. 2019. Estimación de la distribución vertical de combustibles finos del dosel de copas en masas de *Pinus sylvestris* empleando datos LiDAR de baja densidad. *Revista de Teledetección* 53: 1-16. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11241>
- Fosberg, M.A., Lancaster, J.W., Schroeder, M.J. 1970. Fuel moisture response-drying relationships under standard and field conditions. *Forest Science* 16(1): 121–128.
- Hernández-García, J., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez del Valle, J.R., Campos-Ángeles, G.V., Hernández-Hernández, A. 2016. Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(36): 51–63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.59>
- Hood, P.R., Nelson, K.N., Rhoades, C.C., Tinker, D.B. 2017. The effect of salvage logging on surface fuel loads and fuel moisture in beetle-infested lodgepole pine forests. *Forest Ecology and Management* 390: 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.003>
- IPCC 2013. *The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Kane, J.M., Varner, J.M., Knapp, E.E. 2009. Novel fuelbed characteristics associated with mechanical mastication treatments in northern California and south-western Oregon, USA. *International Journal of Wildland Fire* 18(6): 686–697. <https://doi.org/10.1071/WF08072>
- Muñoz-Robles, C., Santana-Arias, R. 2018. Puntos de calor en la Sierra Madre Oriental de San Luis Potosí: patrones espaciales y factores asociados. *Madera y Bosques* 24 (1): e2411565. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411565>
- Pettinari, M.L., Chuvieco, E. 2016. Generation of a global fuel data set using the Fuel Characteristic Classification System. *Biogeosciences* 13(7): 2061–2076. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2061-2016>
- Prichard, S.J., Stevens-Rumann, C.S., Hessburg, P.F. 2017. Tamm review: shifting global fire regimes: lessons from reburns and research needs. *Forest Ecology and Management* 396: 217–233. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.03.035>
- Quintero-Gradilla, S.D., Jardel-Peláez, E.J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., Martínez-Yrizar, A. 2019. Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera y Bosques* 25(3): e2531888. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>
- Reilly, M.J., Elia, M., Spies, T.A., Gregory, M.J., Sanesi, G., Laforteza, R. 2018. Cumulative effects of wildfires on forest dynamics in the eastern Cascade Mountains, USA. *Ecological Applications* 28: 291-308. <https://doi.org/10.1002/eap.1644>
- Reiner, A.L., Vaillant, N.M., Fites-Kauffman, J., Dailey, S.N. 2009. Mastication and prescribed fire impacts on fuels in a 25-year-old ponderosa pine plantation, southern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management* 258(11): 2365–2372. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.050>
- Rodríguez-Trejo, D.A., Tchikoué, H., Cántora-González, C., Contreras-Aguado, R., de la Rosa-Vázquez, A. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia* 45(5): 593–608.
- Rodríguez, E.A. 2014. *Programa del manejo integrado del fuego de San Miguel Chimalapa*. Comunidad de Aprendizaje y Manejo del Fuego (CAMAFU). Oaxaca, México. 80 p.
- Rubio-Camacho, E.A., González-Tagle, M.A., Benavides-Solorio, J.D.D., Chávez-Durán, A.A., Xelhuanzi-Carmona, J. 2016. Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(13): 2601–2614. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i13.486>
- San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J.M., Camia, A. 2013. Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management* 294: 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>
- Sánchez, J., Zerecero, G. 1983. *Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca*. Nota divulgativa No 9 PR – 03. CIFONOR – INIF, SFF. SARH. Ciudad de México, México.
- SEMARNAT 2013. *Programa de manejo Reserva de la Biósfera Volcán Tacaná*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. 208 p. Disponible en: https://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/108.pdf
- Serrada, R. 2008. *Apuntes de Selvicultura General*. Servicio de Publicaciones de la EUIT Forestal. Madrid, España. Disponible en: https://distritoforestal.es/images/Apuntes_de_Selvicultura_completo_2011.pdf
- Stephens, S.L., Moghaddas, J.J. 2005. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management* 215 (1–3): 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.070>
- Vander Yacht, A.L., Keyser, P.D., Kwit, C., Stambaugh, M.C., Clatterbuck, W.K., Simon, D.M. 2019. Fuel dynamics during oak woodland and savanna restoration in the Mid-South USA. *International Journal Wildland Fire* 28 (1): 70–84. <https://doi.org/10.1071/WF18048>
- Villers, M.L. 2006. Incendios forestales. *Ciencias* 81: 60-66.
- Xelhuanzi-Carmona, J., Flores-Garnica, J.G., Chávez-Durán, A.A. 2011. Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(3): 37–52. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i3.624>
- Yebra, M., Santis, A., Chuvieco, E. 2005. Estimación de peligro de incendios a partir de teledetección y variables meteorológicas: variación temporal del contenido de humedad del combustible. *Recursos Rurales* 1: 9-19.
- Zhang, Y., Ji, J., Li, J., Sun, J.H., Wang, Q.S., Huang, X.J. 2012. Effects of altitude and sample width on the characteristics of horizontal flame spread over wood sheets. *Fire Safety Journal* 51: 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.02.006>