

## Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México

### Temporal dynamics of forest fuels and effect of fire in cerro Nambiyugua, Chiapas, Mexico

Roldan Ruiz-Corzo<sup>1</sup> ,  
Deb Raj Aryal<sup>2\*</sup> ,  
Andrea Venegas-Sandoval<sup>1</sup> ,  
Deysi O. Jerez-Ramírez<sup>1</sup> ,  
Karla S. Fernández-Zúñiga<sup>3</sup> ,  
Susana del C. López-Cruz<sup>3</sup> ,  
Juan Carlos López-Hernández<sup>3</sup> ,  
Beatriz Peña-Alvarez<sup>3</sup> ,  
Carlos A. Velázquez-Sanabria<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Av 1a. Sur Pte No. 1460, Col. Centro, Caleras Maciel, CP. 29000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

<sup>2</sup>CONACYT-UNACH, Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozocuaula-Villaflores, km 84.5, CP. 30470. Villaflores, Chiapas, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozocuaula-Villaflores, km 84.5, CP. 30470. Villaflores, Chiapas, México.

\*Autor de correspondencia:  
debraj.aryal@hotmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 20 de enero 2022

Aceptado: 11 de mayo 2022

**Como citar:** Ruiz-Corzo R, Aryal DR, Venegas-Sandoval A, Jerez-Ramírez DO, Fernández-Zúñiga KS, López-Cruz S, López-Hernández JC, Peña-Alvarez B, Velázquez-Sanabria CA (2022) Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): e3253. DOI: 10.19136/era.a9n2.3253

**RESUMEN.** Los combustibles forestales son uno de los principales reservorios de carbono, pero también se consideran un factor involucrado en la ocurrencia e intensidad de incendios forestales. El objetivo de este estudio fue analizar la dinámica temporal de almacenamiento y efecto del incendio sobre los combustibles forestales en bosque de pino (*Pinus oocarpa* Schiede). La medición de hojarasca, mantillo y materiales leñosos se realizó de 2010 a 2021 en cuatro sitios de un bosque de pino del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas con el método del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. En cada sitio, se utilizaron ocho cuadrantes de 30 x 30 cm<sup>2</sup> para coleccionar las muestras de hojarasca y mantillo. Para el secado de las muestras, se utilizaron bolsas de papel estraza y se colocaron en estufa a 70 °C durante 72 horas. El material leñoso caído se determinó con la metodología de intersección planar. La carga de hojarasca y mantillo aumentó gradualmente con el tiempo. Las mayores cargas de hojarasca se obtuvieron en el año 2018 con 12.67 t ha<sup>-1</sup>. Después del incendio forestal del año 2019, la carga de hojarasca disminuyó a 5.67 t ha<sup>-1</sup>, y para el 2021 aumento a 8.65 t ha<sup>-1</sup>. La tendencia de acumulación de material leñoso caído varió según la categoría de horas de ignición. Los resultados de este estudio tienen implicaciones fundamentales en las estrategias y periodicidad del manejo de carga de combustibles forestales y almacenamiento de carbono ya que con el cambio climático se espera mayor frecuencia de incendios forestales.

**Palabras clave:** Almacenamiento de necromasa, bosque de pino, hojarasca; material leñoso caído, funcionamientos ecosistémicos.

**ABSTRACT.** Forest fuel is one of the main carbon pools, but is also considered a factor involved in the occurrence and intensity of forest fires. The objective of this study was to analyze the temporal dynamics of forest fuel storage and the effect of fire in a pine (*Pinus oocarpa* Schiede) forest. The measurement of fresh and decomposed litter, and woody materials was carried out from 2010 to 2021 at four sites of a pine forest in the Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas, with the National Forest and Soil Inventory method. At each site, eight 30 x 30 cm<sup>2</sup> quadrants were used to collect litter samples. To dry the samples, paper bags were used and placed in an oven at 70 °C for 72 hours. The fallen woody material was sampled with the line intersection method. Fresh and decomposed litter load increased gradually over time. The highest litter loads were obtained in 2018 with 12.67 t ha<sup>-1</sup>. After the forest fire in 2019, the litter load decreased to 5.67 t ha<sup>-1</sup>, and by 2021 it increased to 8.65 t ha<sup>-1</sup>. The accumulation trend of fallen woody material varied according to the category of ignition hours. The results of this study have fundamental implications in the strategies and periodicity of forest fuel load management and carbon storage, since a greater frequency of forest fires is expected with climate change.

**Key words:** Necromass storage, pine forest, litter; fallen woody material, ecosystem functions.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son hábitats críticos para la diversidad biológica y proveen de una amplia gama de servicios ecosistémicos para el bienestar humano (Brockhoff *et al.* 2017, Kelly *et al.* 2020). Sin embargo, estos ecosistemas sufren cambios fundamentales a través de tiempo por causas antropogénicas y naturales tales como incendios forestales, cambio de uso del suelo, sucesión y recuperación natural (Aryal *et al.* 2018, Lindenmayer *et al.* 2018, Díaz-Nigenda *et al.* 2021). Estos cambios estructurales y funcionales de los ecosistemas se han exacerbado con el tiempo por efecto de cambio climático (Aryal y Ruiz-Corzo 2020, Halofsky *et al.* 2020). En México, cada año ocurren numerosos incendios forestales en sus diferentes ecosistemas y son producto de las condiciones climatológicas, especialmente sequías prolongadas, cantidad de material combustible acumulado y de factores naturales (rayos y vulcanismo) o por provocación humana (Hernández *et al.* 2016). En algunos casos, estos incendios provocan pérdidas de recursos naturales de gran valor ecológico, económico y vidas humanas (Xelhuantzi *et al.* 2011). Los incendios forestales pueden reducir drásticamente el almacenamiento de carbono y diversidad biológica por alterar las capacidades de captura de carbono o alteración de hábitat natural de flora y fauna (Kelly *et al.* 2020, Sampayo-Maldonado *et al.* 2021).

Los combustibles forestales tales como hojarasca, mantillo y material leñoso seco son uno de los principales componentes involucrados en la ocurrencia e intensidad de esos fenómenos. La intensidad del fuego está en función de la cantidad y del tipo de material susceptible de quemarse. Los combustibles forestales constituyen uno de los tres factores clave que determinan el comportamiento del fuego y los efectos de los incendios forestales, junto con el estado del tiempo atmosférico y las condiciones topográficas (Rentería *et al.* 2005, Wong y Viller 2007, Walker *et al.* 2020). Los combustibles forestales son la biomasa producida por los árboles, con la senescencia se caen y se depositan en el piso forestal a través del tiempo (Walker *et al.* 2020).

Este proceso de caída y descomposición de biomasa senescente es fundamental para la transferencia de la materia orgánica de biomasa viva al suelo y el reciclaje de nutrientes. Por lo tanto, un buen entendimiento de la dinámica temporal de acumulación de esta materia podría contribuir en el manejo adecuado de ecosistemas para evitar riesgos de incendios catastróficos.

Algunos estudios mencionan que por la acción humana, el cambio climático y por falta de conocimiento empírico sobre la dinámica de carga de combustible, el régimen del fuego ha sido alterado en ecosistemas forestales, causando grave daño en su capacidad de provisión de servicios ecosistémicos como captura de carbono, regulación de flujos de agua y conservación de la diversidad biológica (Venkatesh *et al.* 2020). Desde el punto de vista de Cansler *et al.* (2019), las propiedades de los combustibles varían por especie, edad, historia de perturbaciones y productividad de los ecosistemas. La caída de combustibles forestales está determinada por los mecanismos fisiológicos y variables ambientales. Los patrones estacionales de caída de combustibles varían de acuerdo al tipo de ecosistema (Zhang *et al.* 2014, Becker *et al.* 2015, Aryal *et al.* 2015). La caída puede distribuirse uniformemente durante todo el año en los ecosistemas forestales perennes y ocurren en un periodo corto del año en los ecosistemas caducifolios. Teniendo en cuenta que la mayoría de los ecosistemas forestales anualmente producen hojas, flores y frutos, que son desprendidos de las ramas ocasionando acumulación horizontal sobre la superficie del suelo, reciclando y aumentando la carga anualmente, por lo que la cuantificación de la dinámica de producción es importante para el entendimiento del funcionamiento de los ecosistemas forestales (De Jong 2013, Sánchez-Silva *et al.* 2018, Aryal *et al.* 2021).

Existen pocos estudios de análisis de la dinámica y almacenamiento de los combustibles forestales en diferentes condiciones y ecosistemas, por lo que es de suma importancia realizar estudios sobre el tema para implementar acciones de manejo, control y prevención de incendios forestales. De acuerdo con el triángulo del fuego, para que

se genere ignición, es necesario que estén presentes tres elementos: calor, oxígeno y combustible y que al faltar uno de ellos no se generará ignición (Rodríguez-Trejo *et al.* 2020). Por lo tanto, de las tres variables mencionadas, solo el combustible es la única variable que se puede manipular, por lo que es de suma importancia conocer su dinámica temporal y almacenamiento. Por lo anterior, el objetivo del estudio fue analizar la dinámica temporal de almacenamiento y efecto del incendio en los combustibles forestales en bosque de pino del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en ecosistemas forestales de *Pinus oocarpa* (Figura 1) del cerro Nambiyugua en el municipio de Villaflores, Chiapas (Figura 2). El Municipio de Villaflores se localiza en los límites de la Depresión Central y de la Sierra Madre de Chiapas, predominando el relieve montañoso. Sus coordenadas geográficas son 16° 14.0' LN y 93° 16.0' LO. Limita al norte con Suchiapa, Jiquipilas y Ocozocoautla, al este con Chiapa de Corzo y Villa Corzo, al sur con Villa Corzo y Tonalá, al oeste con Jiquipilas y Arriaga. Su extensión territorial es de 1 232.10 km<sup>2</sup>, lo que representa el 14.82% de la superficie de la región Frailesca y el 1.63% de la superficie estatal, su rango altitudinal es de 400 a 2 200 msnm, el tipo de suelo predominante son Cambisol, Fozem, Litosol, Regosol, Rendzina y Vertisol (INEGI 2013).

El Cerro Nambiyugua está ubicado, al noroeste de la cabecera municipal de Villaflores. Las coordenadas geográficas del centro del Cerro son: 16° 16' 45.78" LN, 93° 19' 32.79" LO (Cepeda *et al.* 2010). Presenta una altitud máxima de 1 520 msnm y se caracteriza por rasgos topográficos muy accidentados con pendientes de más de 100%, con cañadas, depresiones y elevaciones. Presenta climas que van desde el cálido subhúmedo con lluvias en verano por debajo de los 800 msnm, hasta el semi-cálido subhúmedo con lluvias en verano de los 800 a 1520 msnm (CONANP 2012).

### Muestreo de combustibles forestales

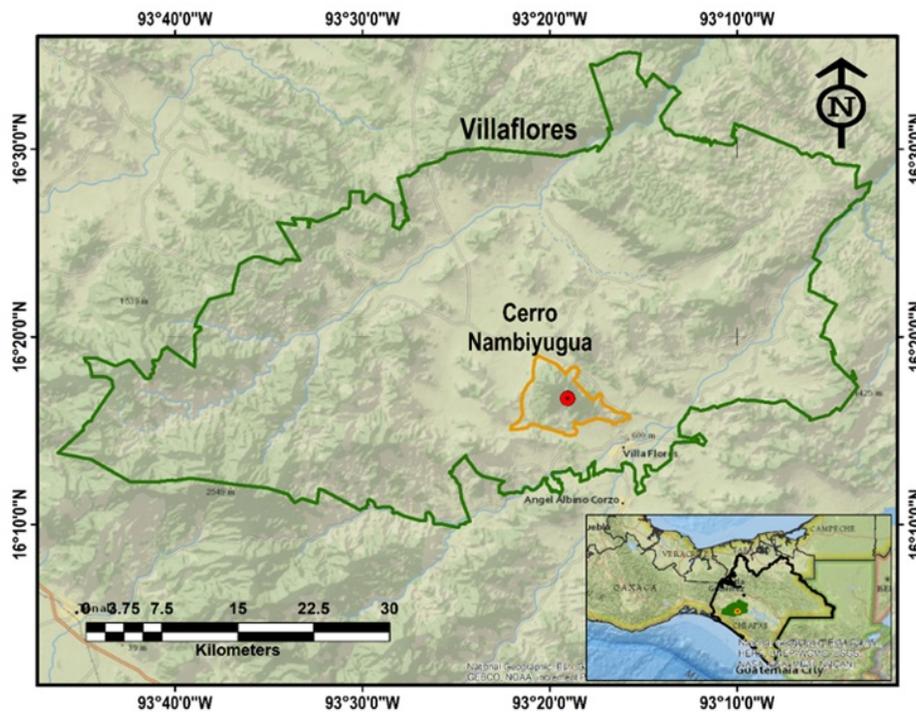
La recolección de datos se realizó en un bosque de pino (*Pinus oocarpa* Schiede), con el método del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) que impulsa a nivel nacional la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). La metodología empleada por el INFyS (2010), consistió en establecer en una Unidad de Muestreo Primaria (UMP) con un radio de 56.42 m para una superficie equivalente a una hectárea. Los conglomerados integrados por cuatro unidades equidistantes del centro a cada 45.14 m, constituida por cuatro sitios circulares de muestreos o Unidades de Muestreo Secundaria (UMS) con un radio de 11.28 m para una superficie aproximada de 707 m<sup>2</sup>, donde se llevó a cabo las mediciones de las variables, Sitio 1 es el centro, el Sitio 2 se colocó a 0° de azimut, el Sitio 3 a una dirección 120° de azimut y el Sitio 4 se acomodó a 240° de azimut, estas distribuciones de los sitios corresponden a una "Y" invertida.

### Hojarasca y Mantillo

Se muestreó la hojarasca en una serie de puntos (ocho) en cada sitio distribuidos en cuatro transectos dentro del sitio circular de 1000 m<sup>2</sup>. El procedimiento consistió en medir el espesor del mantillo, compuesto por una capa de hojarasca y una capa en descomposición, con eso un total de 16 muestras (8 de hojarasca frescas y 8 de humus) fueron colectadas por sitio. La capa de hojarasca es la capa más superficial del horizonte orgánico de suelo, que resultó de la acumulación de hojas y acículas recientemente caídas, en mayor medida, su estructura original y una mínima alteración por descomposición. La capa en descomposición (fermento) es la capa que se encontró justo debajo de la hojarasca como materia orgánica que ha perdido completamente su estructura original y presentó diferentes grados de descomposición (desde materia orgánica completamente descompuesta -humus- hasta parcialmente descompuesta). Este horizonte es más compacto que el de hojarasca e incluye generalmente una alta proporción de madera putrefacta.



**Figura 1.** a) Ecosistemas forestales de pino (*Pinus oocarpa*); b) acumulación de combustibles forestales sobre el suelo; c) incendios, la carga de combustibles forestales como fuente de energía para ignición; d) signos de incendios y reducción de combustibles forestales después de un año del incendio.



**Figura 2.** Localización geográfica del área de estudio.

La profundidad de ambas capas constituyó el espesor del mantillo, mismo que se midió con una cinta métrica. Para la colecta de muestras de hojarasca y fermento, se utilizó un cuadrante de 30 x 30 cm<sup>2</sup> que delimitó el área de muestreo para cada punto señalado. Se midió el peso húmedo de la muestra recolectada en el área del cuadrante. Para el secado de la muestra se utilizaron bolsas de papel estraza que contenían el material y se colocaron, en estufa a 70 °C durante 72 horas. Después de secar las muestras de biomasa, se pesó y se calculó el almacén de materia seca de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$Ah = \left( \frac{Ps(g)}{A(m^2)} \right) \times 100$$

Donde: Ah: Almacén de hojarasca (t ha<sup>-1</sup>), Ps: Peso seco (g) y A: Área de muestreo (0.09 m<sup>2</sup>).

### Material leñoso caído

El muestreo de material leñoso caído se realizó de acuerdo con la metodología de intersecciones planares propuesta por Van Wagner (1982) y Brown (1974). Se consideró material leñoso caído (MLC) a todas las ramillas, ramas y troncos que se ubicaron tendidos sobre la superficie del terreno, separadas de su fuente original (no pegadas al tronco) y acumuladas a ras de suelo de 0 cm hasta 2 m de altura. Se midió este material en cada uno de los sitios de estudio y en los cuatro transectos orientados hacia cada punto cardinal considerando su pendiente, medida desde el centro del sitio hasta el punto final. Se registraron la frecuencia de piezas leñosas intersectadas en los últimos cinco metros del transecto piezas de 1 h, 10 h y en todo el transecto se registró y se midió el diámetro a las piezas leñosas de 100 h y 1 000 h. La categoría de horas se clasificó de acuerdo con la metodología de INFyS (Tabla 1). En el que el tiempo de retardación: Es una forma de medir el tiempo con el que un combustible alcanza el contenido de humedad de equilibrio. Tiempo requerido para perder el 60% (2/3 partes) del contenido de humedad inicial o actual y el contenido de humedad de equilibrio con el ambiente (INFyS 2010).

Para la medición del diámetro del material leñoso caído se utilizó una cinta diamétrica y para el

tiempo de retardación se utilizó un calibrador. El volumen de madera muerta se calculó usando la ecuación propuesta por (Brown y Roussopoulos 1974, Van Wagner 1982).

$$V = \frac{\Pi^2}{8L} \sum_{i=1}^n d_i^2$$

Donde: V = Volumen de madera muerta (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), L = Longitud de la línea de muestreo (m), y di = Diámetros de madera muerta en la intersección (cm).

El peso seco de la madera muerta se calculó aplicando densidad de madera según el estado de descomposición. Se aplicaron densidades de madera de 0.52 g cm<sup>3</sup>, 0.48 g cm<sup>3</sup>, 0.35 g cm<sup>3</sup> y 0.23 g cm<sup>3</sup> respectivamente según su grado de descomposición (Reyes et al. 1992, Gutiérrez et al. 2010).

### Análisis de datos

Se usaron las estadísticas básicas como media, desviación estándar e 95% de intervalos de confianza para reportar las cantidades de combustibles forestales en diferentes años de muestreo. Se realizó una prueba de normalidad de datos usando la prueba de Shapiro-Wilk (W). Se analizó la información estadísticamente utilizando el análisis de varianza (ANOVA, p < 0.05) de una vía para evaluar las diferencias significativas entre los años de muestreo. Se utilizó la Prueba de Tukey (p = 0.05) para verificar la comparación de media entre años de muestreo.

## RESULTADOS

La carga de hojarasca fue significativamente diferente entre los años (F<sub>4,155</sub> = 20.12 y p < 0.001). Se encontró un aumento gradual del almacenamiento de hojarasca de 2010 a 2018, con las mayores cargas de hojarasca en el año 2018 con 12.67 t ha<sup>-1</sup> (Figura 3a). Sin embargo, la carga de hojarasca disminuyó drásticamente después del incendio forestal del año 2019, con la carga de 5.67 t ha<sup>-1</sup> en 2020. Se reflejó que el stock de hojarasca comienza a recuperarse gradualmente de nuevo, notando para el 2021 un aumento a 8.65 t ha<sup>-1</sup> (Figura 3a).

En lo que corresponde al mantillo, su almacén varió significativamente entre los años de muestreo

Tabla 1. Clasificación del material leñoso caído

Categoría	Diámetro (cm)	Tiempo de retardación del fuego (horas)	Medición en el transecto (m)
Finos	Hasta 0.5	1	10 a 15
Regulares	> 0.5 hasta 2.5	10	10 a 15
Medianos	> 2.5 hasta 7.5	100	0 a 15
Gruesos	> 7.5	1000	0 a 15

Modificada del INFyS 2010.

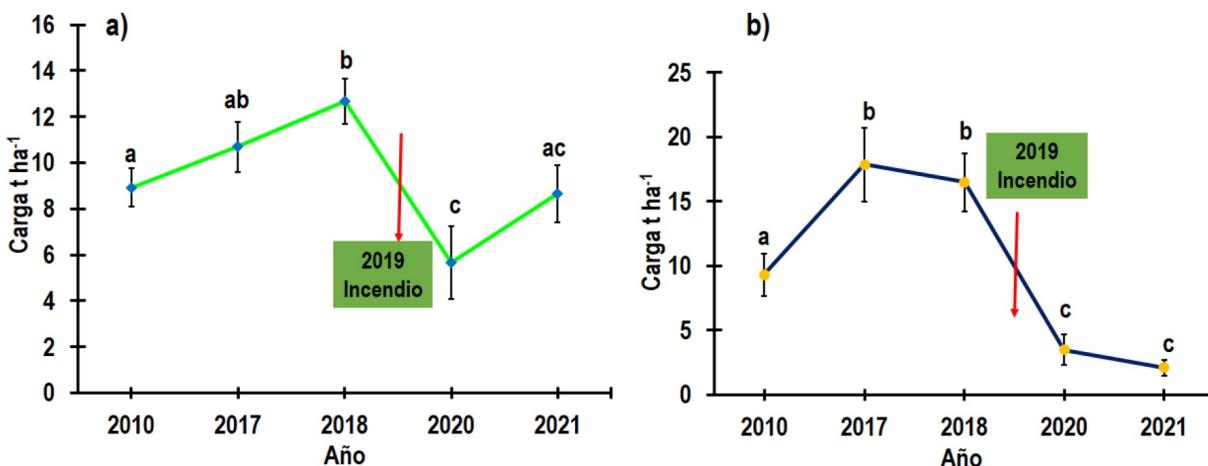


Figura 3. Carga de hojarasca y mantillo en diferentes años de muestreo. a) Hojarasca; b) mantillo. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre años de muestreo (Tukey  $p = 0.05$ ). Barra de error, indican el 95% de intervalos de confianza.

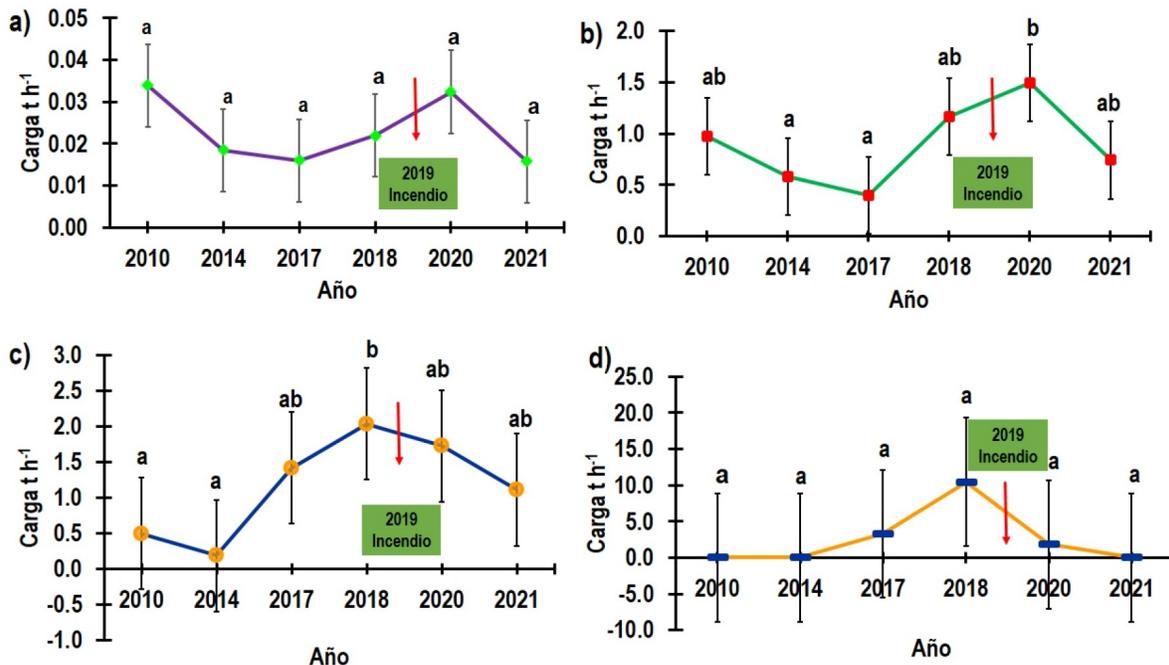
( $F_{4,155} = 56.42$  y  $p < 0.001$ ). Hubo un aumento significativo del 2010 a 2017 pero no hubo diferencias significativas entre los años 2017 y 2018. Las cargas mayores de mantillo se encontraron en el año 2017 con  $17.87 \text{ t ha}^{-1}$ , disminuyendo a  $16.50 \text{ t ha}^{-1}$  en el 2018 por descomposición. A su vez, después del incendio del 2019, se disminuyó drásticamente alcanzando  $3.49 \text{ t ha}^{-1}$  en año 2020 por efecto del incendio forestal ocurrido en el sitio de muestreo. Para el año 2021, la carga de mantillo fue de  $2.10 \text{ t ha}^{-1}$  siendo la menor carga encontrada entre todos los años de muestreo (Figura 3b).

La carga de combustible forestal de material leñoso caído de 1 hora de retardación (Figura 4a), no hubo diferencia significativa entre los años de muestreo. Numéricamente, se encontraron las mayores cargas en los años 2010 y 2020 con  $0.03 \text{ t ha}^{-1}$ , desde el año 2010 al 2017 se observa un decremento en la acumulación de combustible, luego del 2017 al 2020 un aumento. Esto explica que, por el efecto del incendio forestal ocurrido en el 2019, los materiales se desecaron en los ár-

boles para después caer y acumularse en el sitio de muestreo, luego descomponerse disminuyendo la carga de combustible forestal en el año 2021.

En los materiales leñosos caídos de 10 horas se encontraron diferencias significativas solo en entre los años 2014 y 2020, 2017 y 2020 ( $F_{5,90} = 4.50$  y  $p = 0.001$ ). Las cargas mayores fueron  $1.49 \text{ t ha}^{-1}$  en 2020 y  $1.17 \text{ t ha}^{-1}$  en 2018. Para el año 2021, la carga de combustible forestal de 10 horas de retardación se disminuyó a  $0.71 \text{ t ha}^{-1}$  posiblemente por descomposición del mismo (Figura 4b).

Asimismo, en los MLC de 100 horas (Figura 4c), fueron significativamente diferentes entre los años 2010 y 2018, 2014 y 2018 ( $F_{5,90} = 3.28$  y  $p = 0.009$ ). Las cargas de MLC mayores corresponden al año 2018 con  $2.03 \text{ t ha}^{-1}$ , disminuyendo después del incendio forestal del año 2019, con  $1.11 \text{ t ha}^{-1}$  en el año 2021. La MLC de 1000 horas no fueron significativamente diferente entre los años de muestreo ( $F_{5,90} = 0.84$  y  $p = 0.53$ ). Se encontró las mayores cargas en el 2018 con  $10.45 \text{ t ha}^{-1}$ , después del incendio forestal disminuyó a  $1.81 \text{ t ha}^{-1}$  en el 2020,



**Figura 4.** Carga de Material Leñoso Caído en años diferentes de muestreo. a) MLC 1 h, b) MLC 10 h, c) MLC 100 h, d) MLC 1000 h. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre años de muestreo (Tukey  $p = 0.05$ ). Barra de error, indican el 95% de intervalos de confianza.

para el año 2021 no se encontró MLC de 1000 horas de retardación (Figura 4d).

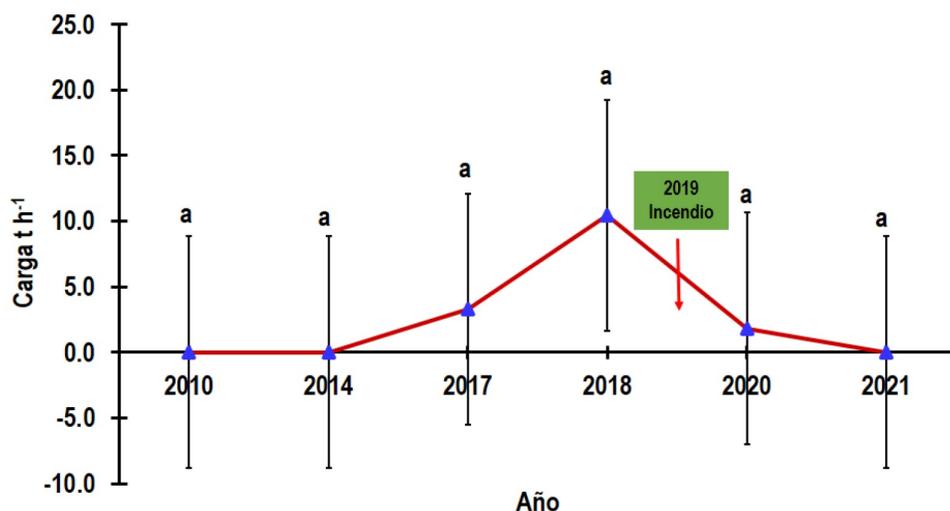
En la suma de carga de combustible forestal de 1, 10, 100 y 1000 horas de retardación no fueron significativamente diferente entre los años de muestreo. Las mayores cargas acumuladas se obtuvieron en el año 2018 con  $13.67 \text{ t ha}^{-1}$ , disminuyendo después del incendio forestal en el 2019 a  $5.06 \text{ t ha}^{-1}$  en el año 2020 y  $1.87 \text{ t ha}^{-1}$  para el año 2021 (Figura 5).

## DISCUSIÓN

Los cambios observados a través del tiempo de carga de combustibles forestales en el bosque de pino (*Pinus oocarpa* Shiede), muestran que la acumulación de hojarasca, mantillo y materiales leñosos caídos de 100 y 1000 h, aumentan gradualmente en el transcurso de los años. Sin embargo, después del incendio forestal en el año 2019, estos combustibles disminuyeron, perdiéndose como emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmosfera. Asimismo, los materiales leñosos caí-

dos de 1 y 10 h, son los más dinámicos acumulando su carga a través de los años. Estos se disminuyeron después del incendio en el año 2019, pero luego recuperaron su carga debido al efecto de la intensidad del fuego en las ramas de los árboles, provocando desecación, desprendimiento de acículas, MLC finos y regulares. Lo anterior es consistente con las observaciones de Flores *et al.* (2005), quienes señalan que la acumulación de combustibles forestales finos puede aumentar después de la ocurrencia de un incendio. Ellos mencionan que la recuperación de los combustibles finos puede ocurrir en un lapso de 7 - 8 semanas después del incendio. Sin embargo, los materiales leñosos de 1000 h pueden tardar más de 20 años para recuperación de carga al nivel antes del incendio (Dunn y Bailey 2015).

Aunque los bosques de *Pinus oocarpa* están adaptados al fuego, al presentarse un incendio severo, sufren de cicatrices sobre el tronco y chamuscado de copa, causando desecación de las acículas y ramillas de los árboles por lo que esto provoca el desprendimiento de hojarasca y MLC de



**Figura 5.** Suma de material leñoso caído de 1, 10, 100 y 1000 horas en diferentes años de muestreo. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre años de muestreo (Tukey  $p = 0.05$ ). Barra de error, indican el 95% de intervalos de confianza.

1 y 10 h principalmente, por ende, la acumulación de combustibles finos sobre la superficie del suelo (Rodríguez *et al.* 2019). De acuerdo con los resultados, las mayores cargas de combustibles existentes sin presencia de incendio fueron en el año 2017 y 2018, por lo que en el área de estudio no se habían presentado perturbaciones. Pero después del incendio del 2019 las cargas de acumulación de combustibles disminuyeron drásticamente, solo la hojarasca comenzó a aumentarse después del incendio reflejando un cambio positivo para el año 2021.

Se observó que la capa de hojarasca tiende a recuperarse más rápido que la capa de mantillo (fermento) después de la perturbación de incendios forestales. La capa de fermento es una capa de acumulación de más tiempo que la hojarasca por lo que su recuperación puede tardar más tiempo de la hojarasca fresca. La pronta recuperación de hojarasca contribuye en la reducción de erosión y degradación suelo después de incendios forestales, principalmente en zonas de laderas (Pereira *et al.* 2018).

La acumulación de carga de los combustibles forestales puede alterarse en el paso de los años, por la época del año y por las perturbaciones naturales o antropogénicas (Brandeis y woodall 2008, Xelhuantzi *et al.* 2011). Además de que los incendios, vien-

tos, huracanes, sequía prolongada son otros factores que pueden alterar la acumulación de combustibles forestales (Halofsky *et al.* 2020, Kelly *et al.* 2020). Al respecto, Gould *et al.* (2008) señalan que la acumulación de combustibles forestales en los ecosistemas forestales es el único componente del triángulo del fuego que puede ser manipulado y controlado por el hombre.

El monitoreo continuo de ecosistemas y el estado de sus funciones como la acumulación de carga de combustibles a largo plazo puede proporcionar advertencias tempranas de los daños por incendios de los ecosistemas forestales (Cruz *et al.* 2018, Lindenmayer *et al.* 2018). Los resultados pueden ser de mucha utilidad en la prevención y control de incendios forestales. Una mejor comprensión de la dinámica temporal de la acumulación de carga de combustible puede ayudar en diseñar estrategias de manejo de combustibles forestales a través de quemadas prescritas de baja intensidad, prevención de incendios a través de brechas corta fuego y periodicidad de estas intervenciones.

El impacto del incendio en la disminución de combustibles es considerable, pero también deja la superficie descubierta lo que provoca la erosión del suelo. Los incendios forestales liberan los gases como dióxido de carbono, monóxido de carbono,

óxido de azufre y óxidos de nitrógeno (Sandoval *et al.* 2021). Además de emisión de gases de efecto invernadero, el incendio provoca la pérdida de vegetación, fauna, contaminación de cuerpos de agua y aire por la propagación de humo, ceniza, aerosoles orgánicos y compuestos orgánicos volátiles (Úbeda y Francos, 2018, Gil 2020). Mientras que Harris *et al.* (2019) mencionan que la intensidad del fuego puede alterar la composición de especies forestales y la acumulación de carbono en diferentes especies. En tanto que otros estudios mencionan que la disminución de combustibles forestales como hojarasca y material leñoso puede alterar la composición y actividad de microorganismos, especialmente los hongos, en descomposición de materia orgánica y reciclaje de nutrientes (Owen *et al.* 2019). Los resultados de este estudio también aportan el conocimiento sobre el comportamiento temporal de ecosistemas forestales y sus respuestas ante los incendios catastróficos.

## CONCLUSIONES

La carga de combustibles forestales aumentó gradualmente con el tiempo, pero disminuyó después de un incendio forestal. La hojarasca y los materiales leñosos caídos de 1 y 10 horas son más dinámicos, lo cual se reflejó en los cambios rápidos en comparación al mantillo y los materiales leñosos caídos de 100 y

1000 horas. Conocer los procesos, patrones y cantidades de combustibles forestales en el ecosistema es una herramienta clave en la gestión y desarrollo de políticas públicas para un manejo adecuado de recursos naturales. El comportamiento de carga de combustibles forestales da pauta para realizar actividades de manejo del fuego como quemas prescritas para promover la regeneración natural y disminuir la carga de combustibles forestales. Estas prácticas pueden ser importantes en la regeneración natural porque si se deja que se acumulen los combustibles, impide que las semillas lleguen al suelo y germinen. Efecto de incendios forestales sobre la dinámica de nutrientes en el suelo, actividades microbianas y otros servicios ecosistémicos son cuestiones importantes que estudiar en el futuro para una mejor comprensión de funcionamiento ecosistémicos en la región.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca con Número de Apoyo: 804577, y a BIOMASA, A.C., por la ayuda en recolección de datos en campo. DRA agradece al proyecto "Estrategias de mitigación de impactos ambientales del sector agropecuario en Chiapas" financiado por CONACYT (#381/2015).

## LITERATURA CITADA

- Aryal DR, Ruiz CR, López CA, Velázquez SC, Gómez CH, Guevara HF, Pinto RR, Venegas VJA, Ley de CA, Morales RD, Chi IE (2018) Biomass accumulation in forests with high pressure of fuelwood extraction in Chiapas, Mexico. *Revista Árvore* 42(3): e420307. DOI: 10.1590/1806-90882018000300007.
- Aryal DR, De Jong BH., Gaona SO, Vega JM, Olguín LE, Cruz SL (2021) Fine wood decomposition rates decline with the age of tropical successional forests in southern Mexico: Implications to ecosystem carbon storage. *Ecosystems* 25(3): 661-677. DOI: 10.1007/s10021-021-00678-w.
- Aryal DR, De Jong BHJ, Ochoa GS, Mendoza VJ, Esperanza OL (2015) Successional and seasonal variation in litterfall and associated nutrient transfer in semi-evergreen tropical forests of SE Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103: 45-60.
- Aryal DR, Ruiz-Corzo R (2020) Carbon accumulations by stock change approach in tropical highland forests of Chiapas, Mexico. *Journal of Forestry Research* 31: 2479-2493.
- Becker J, Pabst H, Mnyonga J, Kuzyakov Y (2015) Annual litterfall dynamics and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro. *Biogeosciences* 12(19): 5635-5646.

- Brandeis TJ, Woodall WC (2008) Assessment of forest fuel loadings in Puerto Rico and the US Virgin Islands. *AMBIO. A Journal of the human Environment* 37: 557-562.
- Brockerhoff EG, Barbaro L, Castagneyrol B, Forrester DI, Gardiner B, González-Olabarria JR, Jactel H (2017) Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 26(13): 3005-3035.
- Brown JK (1974) Handbook of inventorying downed woody material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 24p.
- Brown JK, Roussopoulos PJ (1974) Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science* 20: 350-356.
- Cansler CA, Swanson ME, Furniss TJ, Larson AJ, Lutz JA (2019) Fuel dynamics after reintroduced fire in an old-growth Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Fire Ecology* 15(1): 1-17.
- Cepeda M, Lasch C, Núñez JO, Morales M, González J (2010) Planeación para la Conservación del Cerro Nambiyugua: Un Esfuerzo Conjunto para su Protección. The Nature Conservancy, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Servicio Forestal de los EE. UU. A. Mérida, Yucatán, México. 46p.
- CONANP (2012) Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área de Protección de flora y fauna "Cerro Nambiyugua", en el Estado de Chiapas, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México. 68p.
- Cruz P, Juárez W, Santiago D, Santiago O, Silva E, Calderón O (2018) Combustibles forestales y susceptibilidad a incendios de un bosque templado en la Mixteca alta, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana* 20: 9-14.
- De Jong, BH (2013) Spatial distribution of biomass and links to reported disturbances in tropical lowland forests of southern Mexico. *Carbon Management* 4: 601-615.
- Díaz-Nigenda E, Vázquez-Morales W, Sandoval AV, Morales-Iglesias H, Jiménez SH (2021) Emisiones generadas por el consumo de leña y carbón en la preparación de comida rápida. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(2): e2962. DOI: 10.19136/era.a8n2.2962
- Dunn CJ, Bailey JD (2015) Temporal fuel dynamics following high-severity fire in dry mixed conifer forests of the eastern Cascades, Oregon, USA. *International Journal of Wildland Fire* 24: 470-483.
- Flores GJG, Rodríguez COG, Rosas AOG, Ortega MAT (2005) Evaluación del impacto del fuego en los combustibles forestales, en el Bosque La Primavera. En: Santiago PAL, Fregoso FE, Villavicencio GR, Gallegos RA (ed) I Foro de Investigación y Conservación del Bosque La Primavera. Zapopan Jalisco. pp: 1-11.
- Gil MJE (2020) Incendios forestales: causas e impactos. *El Antoniano* 135: 68-113.
- Gould WA, González G, Hudak AT, Hollingsworth TN, Hollingsworth J (2008) Forest structure and downed woody debris in boreal, temperate and tropical forest fragments. *AMBIO- A Journal of the human Environment* 37: 577-587.
- Gutiérrez VB, Gómez CM, VM, Cornejo O, Eladio H, Prieto R, José A, Gutiérrez V, Mario H (2010) Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede del estado de Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 75-78.
- Halofsky JE, Peterson DL, Harvey BJ (2020) Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology* 16: 4. DOI: 10.1186/s42408-019-0062-81-26.

- Harris LB, Scholl AE, Young AB, Estes BL, Taylor AH (2019) Spatial and temporal dynamics of 20th century carbon storage and emissions after wildfire in an old-growth forest landscape. *Forest Ecology and Management* 449: 117461.
- Hernández GJ, Rodríguez OG, Enríquez del VJR, Campos ÁGV, Hernández HA (2016) Biomasa arbustiva, herbácea y en el piso forestal como factor de riesgo de incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7: 51-63.
- INEGI (2013) Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1: 250,000, Serie V. Instituto Nacional de Estadística Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825570149>. Fecha de consulta: 7 de diciembre de 2015.
- INEGI (2018) Áreas geoestadísticas municipales, Junio 2018. Escala: 1:250000. 1ra edición. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni\\_2018gw.xml?\\_httpcache%20=%20yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent%20=%20no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_httpcache%20=%20yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent%20=%20no). Fecha de consulta: 12 de junio de 2019.
- INFyS (2010) Inventario Nacional Forestal y de Suelos: Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Guadalajara, Jalisco, México. 140p.
- Kelly LT, Giljohann KM, Duane A, Aquilué N, Archibald S, Batllori E, Brotons L (2020) Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science* 370: eabb0355. DOI: 10.1126/science.abb0355.
- Lindenmayer DB, Sato C (2018) Hidden collapse is driven by fire and logging in a socioecological forest ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 5181-5186.
- Martínez VJL, Rodríguez TDA, Borja de la RM, Amparo M, Rodríguez YAG (2018) Propiedades físicas y dinámica de los combustibles forestales en un bosque de encino. *Madera y bosques* 24(2): e2421467. DOI: 10.21829/myb.2018.2421467.
- Owen SM, Patterson AM, Gehring CA, Sieg CH, Baggett LS, Fulé PZ (2019) Large, high-severity burn patches limit fungal recovery 13 years after wildfire in a ponderosa pine forest. *Soil Biology and Biochemistry* 139: 107616. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.107616.
- Pereira P, Francos M, Brevik EC, Ubeda X, Bogunovic I (2018) Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 5: 26-32.
- Rentería AJB, Treviño GEJ, Návar CJDJ, Aguirre COA, Cantú SI (2005) Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11: 51-56.
- Reyes G, Brown, S, Jonathan L, Ariel E (1992) Wood densities of tropical tree species. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 15p.
- Rodríguez TDA, Martínez MP, Lara PJM (2019) Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciencia Florestal* 29: 1033-1047.
- Rodríguez-Trejo DA, Martínez-Muñoz P, Pulido-Luna JA, Martínez-Lara PJ, Cruz-López JD (2020) Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 68: 641-654.
- Rubio CEA, González TMA, Benavides SJDD, Chávez DÁA, Xelhuantzi CJ (2016) Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 2601-2614.

- Sampayo-Maldonado S, Moreno-Aldaco JD, Lara-Ponce E, Piña-Ruiz HH (2021) Diversidad y estructura del bosque de galería del río Fuerte, Sinaloa, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(2): e3046. DOI: 10.19136/era.a8n2.3046.
- Sánchez-Silva S, De Jong BH, Aryal DR, Huerta-Lwanga E, Mendoza-Vega J (2018) Trends in leaf traits, litter dynamics and associated nutrient cycling along a secondary successional chronosequence of semi-evergreen tropical forest in South-Eastern Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 34: 364-377.
- Sandoval DB, Rettig MD, Reyes RT, Oyarzún GM (2021) Impacto de la contaminación aérea por incendios forestales en la morbilidad de la población expuesta. *Neumología Pediátrica* 16: 167-171.
- Francos M (2018) Incendios forestales, un fenómeno global. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales* 23: 253-261.
- Van Wagner CE (1982) Practical aspects of the line intersect method. Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre, Fredericton, New Brunswick. Information Report PI-X-12E. Canada. 11p.
- Venkatesh K, Preethi K, Ramesh H (2020) Evaluating the effects of forest fire on water balance using fire susceptibility maps. *Ecological Indicators* 110: 105-856.
- Walker XJ, Rogers BM, Veraverbeke S, Johnstone JF, Baltzer JL, Barrett K, Bourgeau-Chávez L, Day NJ, Groot WJ, Dieleman CD, Goetz S, Hoy E, Jenkins LK, Kane ES, Parisien MA, Potter S, Schuur EAG, Turetsky M, Whitman E, Mack MC (2020) Fuel availability not fire weather controls boreal wildfire severity and carbon emissions. *Nature Climate Change* 10: 1130-1136.
- Wong GJC, Villers RML (2007) Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas* 62: 87-103.
- Xelhuantzi CJ, Flores GJG, Chávez DAA (2011) Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2: 37-52.
- Zhang H, Yuan W, Dong W, Liu S (2014) Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity* 20: 240-247.