



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio
Climático**

TESIS

Dinámica estacional de combustibles forestales en un gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua

Para obtener el grado de:

**Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio
Climático**

Presenta:

Roldan Ruiz Corzo

Directora:

Dra. Andrea Venegas Sandoval

Codirector:

Dr. Deb Raj Aryal

Asesor:

Dr. Emmanuel Díaz Nigenda

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

agosto de 2024



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

AUTÓNOMA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 21 de agosto de 2024
Oficio No. SA/DIP/0580/2024
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Roldán Ruiz Corzo

CVU: 1101124

Candidato al Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

UNICACH

Presente

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Dinámica estacional de combustibles forestales en un gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua** cuya Directora de tesis es la Dra. Andrea Venegas Sandoval (CVU: 385478) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"


Dra. Carolina Orantes García
Directora



C.c.p. Dra. Sandra Urania Moreno Andrade, Directora del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento.
Mtra. Ana Lucía López Pimentel, Coordinadora del Posgrado, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento
Archivo/minutario.

RJAG/COG/hyb/ljgp/gtr

2024 Año de Felipe Carrillo Puerto
BENEMÉRITO DEL PROLETARIADO,
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR DEL MAYAB.



Secretaría Académica
Dirección de Investigación y Posgrado
Libramiento Norte Poniente No. 1150
Colonia Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Tel:(961)6170440 EXT.4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

Dedicatoria

*A mis **padres**, por confiar en mí y darme fortalezas para lograr culminar este proceso.*

*A mi **esposa**, quien a pesar de las adversidades me ha apoyado moral y emocionalmente.*

*A mis **hijas** que me dan alegría y motivos para seguir preparándome.*

*A mis **hermanas**, por confiar en mis capacidades y alentarme a prepararme académicamente.*

Agradecimientos

A **Dios** por darme la vida y mantenerme de pie para realizar este logro.

A mi primo **Olbet Espinosa** quien fue de gran ayuda en los trabajos de campo.

A la **Dra. Andrea Venegas Sandoval**: Por confiar en mí, gracias por su disposición, orientación en el enriquecimiento del presente trabajo.

Al **Dr. Deb Raj Aryal**: por su amistad, disposición, comprensión, dedicación, apoyo y brindarme sus conocimientos para hacer posible terminar este proceso de formación.

Al **Dr. Emmanuel Díaz Nigenda**: al aportar sus conocimientos en la mejora de esta investigación.

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

Al **IIGERCC-UNICACH**, por la elección para prepararme profesionalmente.

A **Biodiversidad, Medio Ambiente, Suelo y Agua A.C. (M.C. Carlos A. Velázquez S., Ing. Miguel Sánchez y M.C. Alonso López C.)**, por la confianza para llevar a cabo los estudios de Maestría.

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de Figuras.....	iv
Índice de Cuadros	v
Resumen	vi
Abstract	vii
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	3
2.1. Gases de efecto invernadero (GEI) y Cambio climático.....	3
2.2. Combustibles forestales.....	5
2.2.1. Carga de combustibles forestales.....	7
2.2.2 Dinámica de los combustibles forestales	7
2.2.3. Densidad básica de combustibles forestales.....	8
2.2.4. Factores que influyen en la producción de hojarasca	8
2.3. Comportamiento del fuego y su relación con la dinámica de combustibles forestales.	9
3. Planteamiento del problema.....	10
4. Justificación.....	12
5. Pregunta de investigación	13
6. Objetivo general.	13
6.1. Objetivos específicos	13
6.2. Hipótesis	14
7. Metodología.....	14
7.1. Zona de estudio	14
7.1.1. Tiempo atmosférico de la zona de estudio	15
7.2. Recolección de datos.....	16
7.2.1 Material leñoso caído.....	17
7.2.2 Hojarasca y Mantillo.....	19
7.3. Determinación de Variables	22
7.3.1. Biomasa viva aérea	22
7.3.2. Biomasa viva en raíces.....	24
7.3.3. Material leñoso caído.....	24
7.3.4. Estructuras vegetales recolectadas	25

7.4. Análisis de datos	25
8. Resultados	26
8.1. Densidad de arbolado	26
8.2. Grosor de los árboles	27
8.3. Producción mensual de hojarasca	27
8.4. Carga de hojarasca y mantillo.....	30
8.5. Carga de combustible forestal de 1, 10, 100 y 1000 horas	31
8.6. Biomasa aérea y raíces	33
9. Discusión.....	34
9.1. Dinámica en densidad y grosor de árboles	34
9.2. Producción mensual de estructuras vegetales.....	35
9.3. Almacenamiento de combustibles forestales	37
9.4. Reservorios de biomasa en arbolado.....	38
10. Conclusiones.....	39
11. Literatura citada.....	41
Anexos	53
Artículos publicados	53

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.	15
Figura 2. Temperatura media y precipitación del año 2021 de la zona de estudio.	16
Figura 3. Estructura de las unidades de muestreo.....	17
Figura 4. Esquema de los transectos para la toma de datos de material leñoso caído.	18
Figura 5. Ranuras del calibrador para la medición de material leñoso caído de acuerdo con su diámetro y tiempo de retardo.	19
Figura 6. Puntos de muestreo 1-8 donde se levantan los datos y muestra.....	19
Figura 7. Instalación de canastas colectoras de estructuras vegetales.....	21
Figura 8. Estructuras vegetales recolectadas en un gradiente de elevación, en tres ecosistemas forestales.....	22
Figura 9. Número de árboles por hectárea en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.....	26
Figura 10. Producción mensual de hojarasca (t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.....	28

Figura 11. Producción mensual de combustibles forestales (hojas + ramas + flores + semillas, t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.....	30
Figura 12. Almacenamiento de hojarasca y mantillo (t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas..	30
Figura 13. Almacenamiento de material leñoso caído (t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.	32
Figura 14. Almacenamiento total de material leñoso caído (t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.....	32
Figura 15. Almacenamiento de biomasa aérea y raíces (t ha ⁻¹) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas..	33

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación del material leñoso caído.....	18
Cuadro 2. Número de árboles por hectárea de acuerdo con el Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.	27
Cuadro 3. Características dasométricas de <i>Pinus oocarpa</i> vivos, antes y después del fuego.....	35
Cuadro 4. Producción anual de hojarasca en diferentes ecosistemas.	36

Resumen

Los combustibles forestales son importantes en la fijación de carbono, pero también son la fuente de energía para el desarrollo de incendios por lo que corresponden uno de los elementos clave en el comportamiento del fuego. El objetivo del presente estudio fue analizar la dinámica de producción y almacenamiento de combustibles forestales en tres ecosistemas diferentes delimitados por un gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua, municipio de Villaflores, Chiapas. Se utilizó el método del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Se utilizaron ecuaciones alométricas para calcular la existencia de biomasa aérea y raíces. En cada ecosistema se establecieron cuatro sitios de muestreo con radio de 11.28 m, se instalaron 16 canastas colectoras de 0.50 m², colocadas a un metro de altura del suelo para calcular la producción de hojarasca mensual de enero a diciembre de 2022. Para coleccionar hojarasca y mantillo se utilizaron ocho cuadrantes de 30 por 30 cm². En el secado de muestras se utilizaron bolsas de papel estraza, colocadas en estufa a 60 °C durante 72 horas. El material leñoso caído se determinó con la metodología de interacciones plantares. Las mayores cargas totales de hojarasca, mantillo y material leñoso caído, se obtuvieron en el ecosistema de pino con 29.01 t ha⁻¹. Las mayores cifras en producción de hojarasca se obtuvieron en los meses de enero y abril, con una media de 1.34 ± 0.19 y 0.74 ± 0.13 t ha⁻¹ respectivamente. En encino la mayor producción se presentó en el mes de marzo con 1.08 ± 0.25 t ha⁻¹; mientras que la selva baja alcanzó la mayor producción en el mes de enero con 0.85 ± 0.26 t ha⁻¹, con una tendencia en disminución al mes de junio. Los resultados tienen

alcances importantes en planes para el manejo de cargas de combustibles forestales y depósitos de carbono.

Palabras clave: Producción de hojarasca, funciones ecosistémicos, ecosistemas forestales, almacenamiento de biomasa, material leñoso caído.

Abstract

Forest fuels are important in carbon fixation, but they are also the source of energy for fire development, so they correspond to one of the key elements in fire behavior. The objective of this study was to analyze the dynamics of production and storage of forest fuels in three different ecosystems delimited by an elevation gradient in Cerro Nambiyugua, municipality of Villaflores, Chiapas. The National Forest and Soil Inventory method was used. Allometric equations were used to calculate the existence of aerial biomass and roots. In each ecosystem, four sampling sites with a radius of 11.28 m were established, 16 collection baskets of 0.50 m² were installed, placed at a height of one meter from the ground to calculate the monthly litter production from January to december 2022. Eight 30 by 30 cm² quadrats were used to collect leaf litter and mulch. For the drying of samples, brown paper bags were used, placed in an oven at 60 °C for 72 hours. The fallen woody material was determined using the plant interactions methodology. The highest total loads of litter, mulch and fallen woody material were obtained in the pine ecosystem with 29.01 t ha⁻¹. The highest litter production figures were obtained in January and April, with a mean of 1.34 ± 0.19 and 0.74 ± 0.13 t ha⁻¹ respectively. In oak the highest production occurred in march with 1.08 ± 0.25 t ha⁻¹; while lowland forest reached the highest production in january with 0.85 ± 0.26 t ha⁻¹, with a decreasing trend in june. The

results have important implications for plans for the management of forest fuel loads and carbon stocks.

Key words: litter production, ecosystem functions, forest ecosystems, biomass storage, fallen woody material.

1. Introducción

Los incendios forestales presentan uno de los principales desafíos para la conservación de los ecosistemas terrestres. Si bien forman parte de los procesos ecológicos en diferentes tipos de vegetación, cada ecosistema presenta un régimen de fuego particular y su relación con este puede resultar benéfico o dañino por lo que se les ha clasificado en tres tipos: los sensibles, independientes y dependientes del fuego (Obando *et al.*, 2022). En la mayor parte del mundo los regímenes naturales del fuego (condiciones del fuego que caracteriza a un ecosistema) se han alterado por las actividades humanas. Además de los efectos para el medio ambiente, los incendios forestales también tienen impactos adversos directos e indirectos para la sociedad, como la muerte y lesiones sufridas por los combatientes de incendios forestales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp] *et al.*, 2012; Neger, 2021). Los incendios forestales son un fenómeno que ha estado presente en la Tierra de manera natural desde hace millones de años, muchos ecosistemas se han adaptado al efecto del fuego, ayudando a la permanencia y renovación (Pyne, 2019; Rodríguez, 2014). Desde el punto de vista de Wong y Viller (2007), la ocurrencia y el comportamiento de los incendios forestales dependen de distintos aspectos, los cuales son: acumulación, disponibilidad y características de los combustibles forestales, así como factores como sequías prolongadas, tiempo atmosférico, topografía del terreno, fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y condiciones derivadas del cambio climático.

El combustible forestal puede ser definido bajo diferentes enfoques. De acuerdo con Rodríguez (1996) el combustible forestal es toda biomasa que potencialmente

puede arder al ser expuesta a una fuente de calor. Por su parte, Jardel *et al.* (2018), la define como la “materia prima” que alimenta la combustión y la propagación de los incendios en los bosques, selvas, matorrales, pastizales y otros tipos de vegetación.

También, se refiere a la biomasa producida por las plantas a través de la fotosíntesis, un proceso en el cual también se libera oxígeno. Arellano *et al.* (2017) señalan que, son agrupaciones espaciales de partes de vegetales vivos y muertas en todas sus variantes, formando parte integral de los biomas vegetales y por ello un componente fundamental de los ecosistemas forestales, son la fuente de energía para el desarrollo del incendio que no sería posible sin su presencia, y uno de los elementos clave en el comportamiento del fuego y en sus efectos, modulando su intensidad y severidad.

Las distintas propiedades de los combustibles forestales como: tamaño, forma, continuidad, carga, contenido de sustancias inflamables, compactación, distribución, arreglo sobre la superficie (horizontal y vertical), densidad y contenido de humedad que presentan, entre otras, determinan en conjunto con el relieve y el tiempo atmosférico, el comportamiento del fuego (Neri *et al.*, 2009). Lo anterior, determina qué tan complejas pueden resultar las acciones de prevención, control y/o supresión de un incendio forestal, incluyendo estrategias de manejo de combustible forestales que ayuden a la reducción de combustible disponible (Chávez *et al.*, 2016). De acuerdo al triángulo del fuego, menciona que 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, por lo tanto, de los tres elementos mencionados solo el combustible es el único elemento que se puede

manipular, por lo que es de suma importancia conocer su carga y producción (Icela *et al.*, s/f); Pleguezuelo *et al.*, 2015).

Por otra parte, los combustibles forestales no permanecen constantes, la caída de hojarasca en diferentes ecosistemas incrementa la acumulación y carga, por lo que por falta de información se toman malas decisiones para la puesta en marcha de prácticas efectivas de prevención de incendios forestales, manejo del fuego y de los combustibles forestales.

Con base a lo anterior, surge el interés de generar información de la dinámica de combustibles forestales que permita la implementación de estrategias de manejo de combustibles que ayuden a su reducción, evitando así incendios catastróficos que liberen a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono, así como otros contaminantes atmosféricos. A su vez, poder realizar acciones de prevención de incendios forestales en el Cerro Nambiyugua, por lo que, a pesar de ser un área de protección de recursos naturales de Villaflores, Chiapas, no está exenta de presentar incendios forestales.

2. Marco teórico

2.1. Gases de efecto invernadero (GEI) y Cambio climático

El efecto invernadero es un fenómeno natural que siempre ha existido y permite la vida en el planeta; este efecto hace posible almacenar calor en la superficie de la Tierra gracias a la presencia de unos gases denominados de efecto invernadero (GEI). Si no hubiera estos gases en la atmósfera, la temperatura en las noches descendería por debajo de los 10°C, como en la Luna, que haría inviable la vida en la Tierra (Lam, 2010). Sin embargo, este fenómeno, que es natural y benéfico para

la existencia del ser humano, se convirtió en un problema debido que la sociedad, en su afán por el desarrollo y mayor calidad de vida, comenzó a emitir demasiados GEI, haciendo que la capacidad de almacenar calor se incremente, dando origen a un calentamiento del planeta, denominado calentamiento global, que ha generado como consecuencia la modificación del sistema climático, frecuencia de sequía, incremento en la cantidad de incendios forestales, reducción de la capacidad de los ecosistemas terrestres para absorber CO₂, la absorción oceánica también podría menguar por el aumento de la temperatura de la superficie del mar (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2021).

Por otro lado, el cambio climático es un problema global que ha sido tratado por los expertos de todo el mundo. Estos han concluido que el clima cambia debido a actividades económicas, en particular con aquellas relacionadas al sector agropecuario y energético (Díaz, 2012). Asimismo, el cambio climático tiene una influencia significativa en la forma en que los incendios forestales se comportan en los distintos ecosistemas terrestres. No sólo tiene un impacto sobre los factores ambientales, sino también un impacto significativo en la economía, seguridad alimentaria y productividad agrícola. A su vez, los ecosistemas y la biodiversidad están cambiando y se están degradando hasta el grado de perder su valor y reducir la capacidad de ofrecer servicios ecosistémicos. Durante las últimas décadas, demasiada atención se ha prestado a la supresión de incendios y prevención. Sin embargo, hace falta más esfuerzo para la comprensión de las condiciones cambiantes de los mismos como consecuencia del cambio climático (Finiza, 2012; Lozano *et al.*, 2021).

La pérdida de los ecosistemas terrestres, las alteraciones a escala planetaria por causas de actividades antropogénicas, como por ejemplo pérdida de hábitat, cambio de uso del suelo por aumento de la frontera agropecuaria, explotación de recursos naturales, efectos y aumento de especies invasoras y la alteración de los ciclos biogeoquímicos son componentes del cambio global. Estos fenómenos están relacionados y constituyen amenazas para la biodiversidad y acrecientan el cambio climático. Asimismo, el cambio climático aumenta el estrés hídrico de los ecosistemas forestales los cuales a menudo ya viven al límite de sus posibilidades, como en el caso de algunos encinares y pinares que presentan tasas de evapotranspiración casi iguales a las de precipitación. El calentamiento activa sucesos propios de los ecosistemas más como son los incendios forestales o la emisión de compuestos orgánicos volátiles (Obeso y Laiolo, 2021).

En la actualidad las altas temperaturas características de los procesos del cambio climático, sumado a la intervención de los regímenes del fuego por el hombre, están ocasionando incendios cada vez más desastrosos (Obando *et al.*, 2022).

2.2. Combustibles forestales

Uno de los elementos esenciales para que ocurra un incendio es el material combustible, el cual se define como toda biomasa que tenga la capacidad de encenderse y arder al ser expuesto a una fuente de calor. Este es fundamental para la estimación de la inflamabilidad y el peligro de incendios forestales, el comportamiento del fuego, la evaluación de sus efectos ecológicos, y la toma de decisiones para prácticas de manejo de fuego, cimenta las bases para un adecuado manejo de los mismos. Además, el conocer las características de los combustibles

evidencia de forma cuantitativa las cantidades y tipos de vegetación en donde se encuentran las cargas así como la ubicación espacial del área de estudio, de presentarse condiciones atmosféricas adecuadas y un factor de ignición (natural o antropogénico), podrían desencadenar incendios forestales de grandes dimensiones cuya biomasa quemada, se convertiría en una enorme fuente de GEI que contribuirán a la acentuación de las consecuencias del cambio climático (Díaz *et al.*, 2012; Chávez *et al.*, 2016)

Las propiedades de los combustibles varían según las especies que se encuentren en el ecosistema; además de la edad, la historia de perturbaciones y productividad son algunos factores que contribuyen a la intensidad y propagación del fuego, a su vez, la heterogeneidad probablemente contribuye a un comportamiento del fuego diferencial a una pequeña escala y heterogeneidad en el ambiente post fuego. Con relación a su clasificación y considerando el lugar que éstos ocupan dentro del sitio, los combustibles pueden ser terrestres, superficiales y aéreos (Rentería *et al.*, 2005; Cansler *et al.*, 2019).

Asimismo, Wong y Villers (2007) afirman que la variación de humedad en los combustibles, también depende de la relación superficie/volumen que presentan, ya que los combustibles con un mayor diámetro presentan una menor relación superficie/ volumen y en aquéllos con menor diámetro la relación aumenta, por lo tanto, en estos últimos la probabilidad de incendiarse será mayor. La densidad y el estado de descomposición, así como las sustancias químicas de la madera, son factores igualmente importantes que intervienen en el contenido de humedad de los combustibles.

2.2.1. Carga de combustibles forestales

La cantidad de combustibles forestales que se encuentran acumulados, juega un papel importante en el cambio climático, por lo que la adecuada estimación permite realizar acciones de manejo para disminuir los incendios forestales. La cantidad se puede estimar directamente mediante el pesaje o indirectamente mediante los sistemas de información geográfica y con el empleo de ecuaciones alométricas (Flores *et al.*, 2018; Cruz *et al.*, 2018).

El entendimiento de las propiedades físicas de los combustibles forestales es importante en la obtención de datos que permiten la evaluación, comportamiento del fuego, impactos de los incendios forestales, planificación de manejo del fuego como quemas prescritas, prácticas de manejo de los combustibles, toma de decisiones en el combate de incendios forestales, evaluación y monitoreo de biomasa y almacenamiento de carbono en adaptación y mitigación al cambio climático (Morfin *et al.*, 2012).

2.2.2 Dinámica de los combustibles forestales

Se refiere al proceso de incorporación y descomposición de hojarasca, materiales leñosos caídos, que por el aumento en la carga y disponibilidad pueden entrar en ignición, es de interés para estimar el comportamiento del fuego, modelación de cargas de combustibles a través del tiempo, manejo de combustibles forestales y fuego, también para entender la interacción entre el fuego y los combustibles forestales (Bonilla *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2018).

2.2.3. Densidad básica de combustibles forestales.

La densidad es propia de cada ecosistema forestal, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que la componen. Es una propiedad física que tiene que ver con la dureza, el peso, la resistencia y la abrasión del combustible forestal. En incendios forestales, la densidad básica es importante al estar relacionado positivamente con los métodos de transferencia de calor. Los combustibles densos tardan más en arder, pero una vez que logran la ignición lo realizan con mayor magnitud que los que son menos densos (Ordoñez *et al.*, 2015). Otro aspecto importante asociado con la densidad de los combustibles es que se pueden utilizar como energías renovables en la industria de la calefacción, refrigeración, biocombustible, para realizar pellets y briquetas como sustitución de leña o carbón, también combustibles líquidos bajo en emisiones, en el que es posible obtener mayor eficiencia en el uso de la energía (Secretaría de Energía [SENER], 2012).

2.2.4. Factores que influyen en la producción de hojarasca

La producción de hojarasca es la medida de la producción primaria neta del ecosistema y está fuertemente correlacionada con el incremento de la biomasa e incendios forestales; cumplen con una función en un escenario fluctuante y complejo que cada vez requiere más atención para: entender el funcionamiento de los ecosistemas, el reciclaje de nutrientes y el buen manejo para evitar incendios forestales; sin embargo, es afectada por variables ambientales como precipitación, temperatura, viento, elevación, fertilidad de los suelos y la evapotranspiración potencial (Oelbermann y Gordon, 2000; López *et al.*, 2013). Los aportes de hojarasca varían ampliamente entre ecosistemas forestales en términos de calidad

y cantidad. La calidad de la materia orgánica del suelo es de gran importancia para la mayoría de los procesos funcionales que se registran en el suelo de los ecosistemas forestales (Santa *et al.*, 2004).

Desde el punto de vista de Zhang *et al.* (2014) y Becker *et al.* (2015), la caída de hojarasca está determinada por el mecanismo fisiológico de los ecosistemas como por variables ambientales, se distribuyen uniformemente durante el año para los ecosistemas forestales caducifolios y ocurren una vez durante el inicio del año para los ecosistemas forestales perennes. Los patrones estacionales de caída de hojarasca tienen formas diversas y varían de acuerdo al tipo de ecosistema. La producción de hojarasca depende de la temperatura, por lo tanto, disminuye en elevaciones más altas. El patrón anual depende de las condiciones climáticas estacionales.

La mayoría de los ecosistemas forestales anualmente producen hojas, flores y frutos que son desprendidos de las ramas ocasionando acumulación horizontal de la superficie del suelo, reciclando y aumentando la carga anualmente, por lo que la cuantificación de la dinámica de producción de hojarasca es importante para el entendimiento de la fenología de los ecosistemas forestales (Aryal *et al.*, 2015; de Jong, 2013).

2.3. Comportamiento del fuego y su relación con la dinámica de combustibles forestales.

Los incendios forestales son producto de las condiciones climatológicas, especialmente de sequías prolongadas, de la gran cantidad de material combustible acumulado y de un factor de ignición natural (rayos y vulcanismo) o humano, cuando

son provocados (Estrada y Ángeles, 2007 citado por Hernández *et al.*, 2016). El combustible forestal es uno de los principales elementos involucrados en la ocurrencia de esos fenómenos y es un factor determinante para definir el riesgo del evento, ya que el grado de peligro está en función de la cantidad y del tipo de material susceptible de quemarse presente en cada ecosistema (Rentería *et al.*, 2005).

En zonas específicas, la acción antropogénica y el cambio climático han alterado el régimen del fuego en varios ecosistemas forestales, por lo que se hace necesario generar información que permita implementar estrategias de manejo de los combustibles forestales disponibles a ignición, orientadas a su reducción y con ello, disminuir el riesgo de eventos catastróficos, ya que es el único factor del triángulo del fuego que se puede manipular (Rubio *et al.*, 2016; Chávez *et al.*, 2016; Castañeda *et al.*, 2015). La información generada contribuye a tomar decisiones relacionadas con el manejo del fuego, así como instrumentar acciones preventivas como las quemas prescritas, y de evaluación de los efectos de los incendios sobre los ecosistemas (Rodríguez *et al.*, 2011). Asimismo, conforme el intervalo de los incendios forestales es mayor, se acumula más combustible y, por lo tanto, el comportamiento del fuego será más severo (Xelhuantzi *et al.*, 2011).

3. Planteamiento del problema

Los ecosistemas forestales son una fuente de combustibles que cuando alcanzan niveles altos de carga, continuidad y disponibilidad, determinan varios factores relacionados a los incendios forestales (riesgo, peligro, intensidad, frecuencia, entre otros). Más aún, la masa de combustibles disponibles difiere entre estratos y entre

ecosistemas forestales, determinando el tipo de incendio que se puede presentar (Maldonado *et al.*, 2012; citado por Flores *et al.*, 2018).

Por otro lado, 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 el relieve del terreno. De los tres factores del ambiente del fuego, el combustible forestal es el único que puede ser modificado a través de intervenciones de manejo. La caracterización de los combustibles forestales es fundamental para la evaluación de la inflamabilidad, peligro y efectos ambientales de los incendios, así como para el desarrollo de prácticas adecuadas de manejo del fuego (Jardel *et al.*, 2018). En ese tenor la dinámica de carga de combustibles forestales es de mucha importancia para reducir los riesgos, peligros e incidencia de incendios y para desarrollar prácticas relacionadas al manejo de combustibles y realizar acciones de prevención de incendios catastróficos.

Sin embargo, la dinámica de la producción estacional de hojarasca y el almacenamiento de combustible forestal, no son bien conocidas en el gradiente altitudinal en el Cerro Nambiyugua, lo que provoca malas decisiones sobre prácticas de conservación y manejo forestal (Rodríguez *et al.*, 2020). Los estudios específicos del ecosistema sobre la estacionalidad de la producción hojarasca y la carga de combustible forestal ayudarían a planificar mejor los programas de prevención de incendios forestales, la productividad del ecosistema y las estrategias de secuestro de carbono.

Con base en lo anterior se plantea la pregunta de investigación ¿Cómo cambia la producción y almacenamiento de combustibles forestales en estacionalidad y gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas, México?

4. Justificación

Ante la problemática de la presencia de los incendios forestales por la acumulación de combustibles forestales en el municipio de Villaflores, Chiapas, específicamente en el Cerro Nambiyugua, poniendo en riesgo los bosques sensibles al fuego, la flora, la fauna, las propiedades y la vida humana, resulta de interés conocer la cantidad de combustibles forestales existentes en la zona de estudio, así como el comportamiento de la tasa de producción y almacenamiento en un gradiente de elevación.

La presente investigación surge de la necesidad, de analizar la dinámica de producción y almacenamiento de combustibles forestales en diferentes altitudes, específicamente en tres ecosistemas diferentes. Lo cual, busca proporcionar información útil que ayude a los tomadores de decisiones para realizar acciones de manejo de combustibles forestales y prevención de los incendios forestales.

Debido a que no se cuenta con estudios de la dinámica de los combustibles forestales en la zona de estudio, el presente trabajo es importante para obtener mayores conocimientos y datos confiables sobre la dinámica y acumulación de los combustibles forestales. Por lo que, los resultados obtenidos ayudarán a proponer estrategias de manejo de combustibles forestales que favorezca su reducción, con

la finalidad de realizar acciones de prevención de incendios forestales, contribuyendo a la conservación de flora y fauna en los ecosistemas de estudio del Cerro Nambiyugua.

Asimismo, el trabajo tiene una utilidad metodológica, por lo que se podrán realizar futuras investigaciones de tal manera que los sitios empleados en el presente estudio permanezcan de manera permanente para el monitoreo de almacenamiento de carbono, estimar índices de diversidad de especies, caída y tasa de descomposición de hojarasca.

5. Pregunta de investigación

¿Cómo cambia la producción y almacenamiento de combustibles forestales en estacionalidad y gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas, México?

6. Objetivo general.

Analizar la dinámica de producción y almacenamiento de combustibles forestales en tres ecosistemas diferentes delimitados por un gradiente de elevación en el Cerro Nambiyugua, municipio de Villaflores, Chiapas.

6.1. Objetivos específicos

Cuantificar la tasa de producción y almacenamiento de combustibles forestales en un gradiente de elevación.

Evaluar la variación de producción de combustibles forestales en diferentes estaciones (meses) del año.

Relacionar la producción de combustibles forestales con la biomasa viva existente.

6.2. Hipótesis

La tasa anual de producción y almacenamiento de combustibles forestales varía por la altura sobre el nivel del mar.

La dinámica de producción de combustibles forestales variará al menos en dos estaciones (meses) del año.

7. Metodología

7.1. Zona de estudio

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' N y 93° 16.0' O. 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 km², 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, Faozem, Litosol, Regosol, Rendzina y Vertisol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014).

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" N, 93° 19" 32.79" O (Cepeda *et al.*, 2010). Presenta una altitud máxima de 1,520 msnm y se caracteriza por rasgos topográficos muy accidentados, 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 1,520 msnm (Comisión Nacional de Áreas

Naturales Protegidas [CONANP], 2012). La vegetación predominante es bosque de pino, encino, pino-encino y selva baja caducifolia (INEGI, 2016).

Este proyecto de investigación se realizó en el año 2022 en tres conglomerados considerando un gradiente de elevación en tres ecosistemas forestales: selva baja tropical (670 msnm), bosque de encino (775 msnm) y bosque de pino (1010 msnm) (Figura 1).

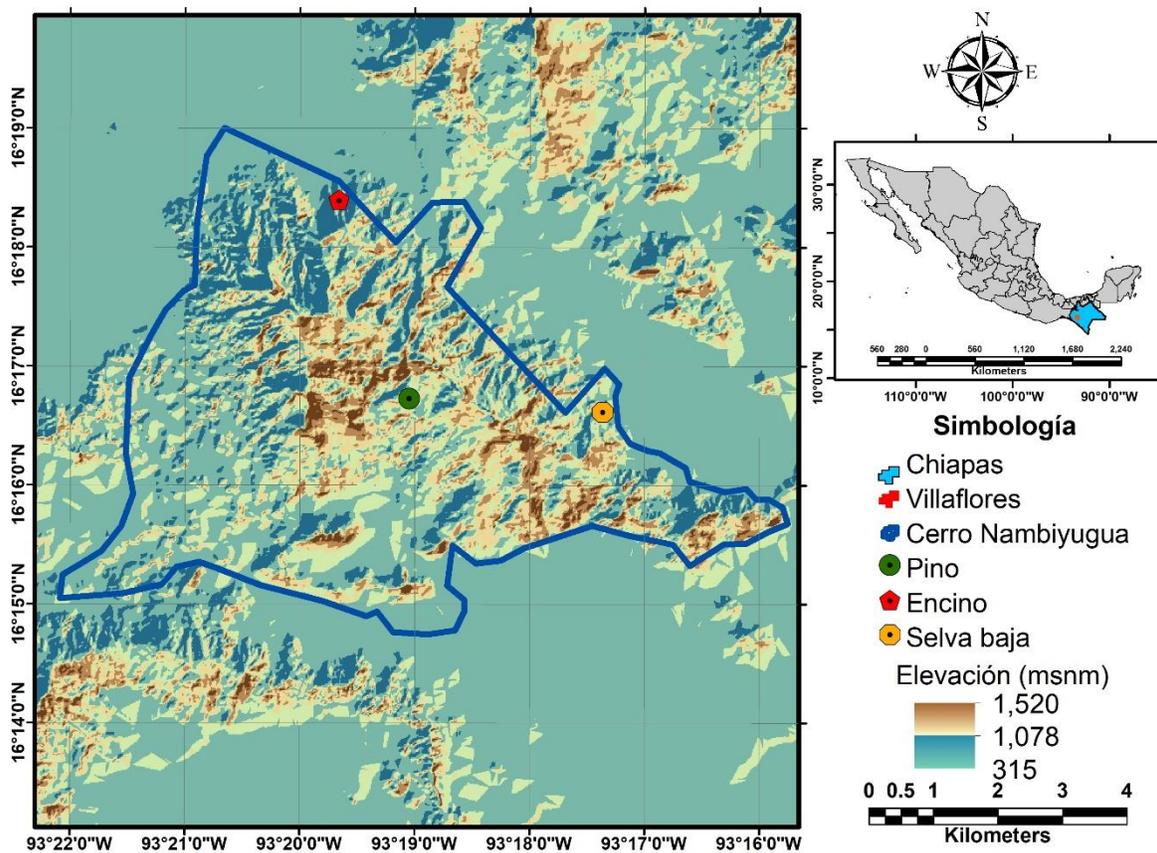


Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2018).

7.1.1. Tiempo atmosférico de la zona de estudio

En el Cerro Nambiyugua para el año 2021, los meses con mayor calor son marzo y abril, alcanzando temperaturas de 38.63 y 39.04 °C, los meses con menor

temperatura son septiembre y octubre con temperaturas de 30.88 y 30.13 °C. La precipitación mensual va de 0.19 a 9.14 mm, los meses más lluviosos son junio, agosto y septiembre con 9.14, 8.51 y 7.52 mm. Los meses con menor precipitación corresponde a febrero, enero y diciembre con 0.19, 0.51 y 0.54 mm (Figura 2).

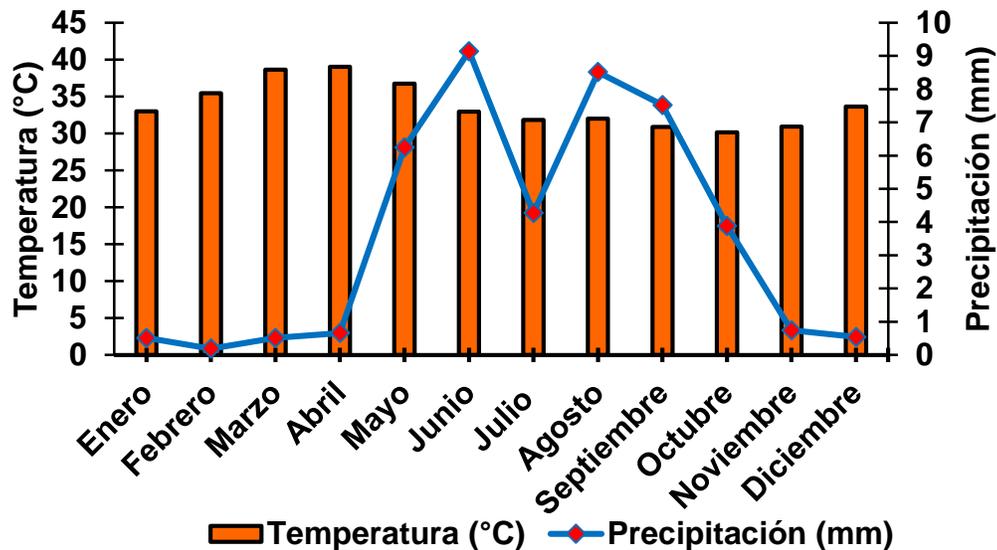


Figura 2. Temperatura media y precipitación del año 2021 de la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia con datos de NASA (2022).

7.2. Recolección de datos

La recolección de datos se realizó 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), consiste en establecer una Unidad de Muestreo Primaria (UMP) con un radio de 56.42 m para una superficie equivalente a una hectárea (Figura 3). Los conglomerados integrados por cuatro unidades equidistantes del centro a cada 45.14 m, constituida por cuatro sitios circulares de muestreo o Unidades de Muestreo Secundaria (UMS) con un radio de 11.28 m para una superficie aproximada de 707 m², donde se llevan a cabo

las mediciones de las variables: Sitio 1 (S1) es el centro, el Sitio 2 (S2) se coloca a 0° de azimut, el Sitio 3 (S3) es a una dirección 120° de azimut y el Sitio 4 (S4) se acomoda a 240° de azimut, estas distribuciones de los sitios corresponden a una “Y” invertida. Lo anterior para la cuantificación y medición de especies forestales.

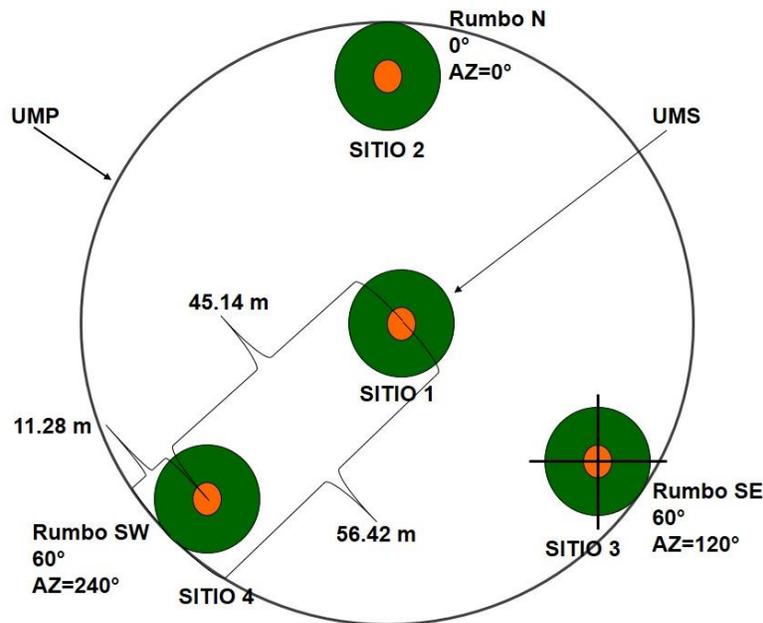


Figura 3. Estructura de las unidades de muestreo. Unidad de Muestreo Primario (UMP), Unidad de Muestreo Secundario (INFyS, 2010).

7.2.1 Material leñoso caído

Fueron determinados de acuerdo con la metodología de intersecciones planares propuesta por Van Wagner (1982) y Brown (1974). Se consideró como material leñoso caído a todas las ramillas, ramas y troncos que se ubicaron tendidos sobre la superficie del suelo, separadas de su fuente original (no pegadas al tronco), 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 (Figura 4) considerando su pendiente, medida desde el centro del sitio hasta el punto final.

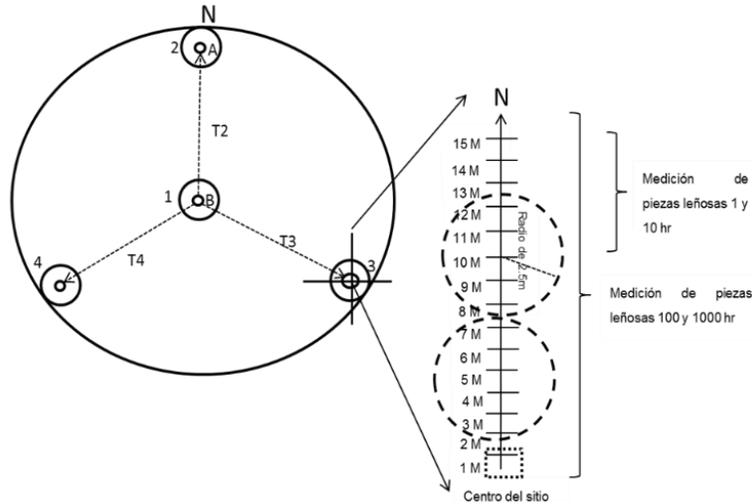


Figura 4. Esquema de los transectos para la toma de datos de material leñoso caído.

Fuente: (INFyS, 2010).

La información que se registró en cada uno de los transectos fue: Frecuencia de aparición de las piezas leñosas: se midieron las piezas leñosas interceptadas en cada uno de los transectos (N, S, E, O). La frecuencia se clasificó de acuerdo con la metodología de intersecciones planares (INFyS, 2010) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación del material leñoso caído

Categoría	Diámetro (cm)	Tiempo de retardación (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

Fuente: (INFyS, 2010; Xelhuantzi *et al.*, 2011)

Para la medición del diámetro del material leñoso caído se utilizó una cinta diamétrica y para el tiempo de retardación se utilizó un calibrador como se muestra en la Figura 5.

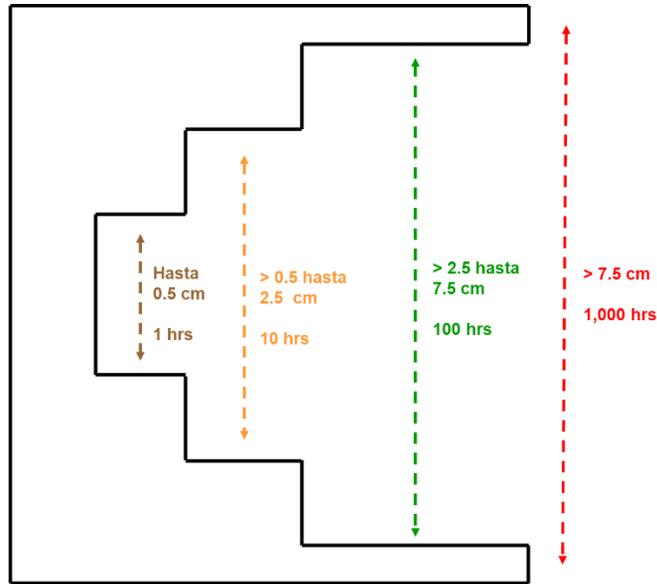


Figura 5. Ranuras del calibrador para la medición de material leñoso caído de acuerdo con su diámetro y tiempo de retardo.

Fuente: elaboración propia guiado de Xelhuantzi *et al.* (2011).

7.2.2 Hojarasca y Mantillo

Se midió en una serie de ocho puntos en los mismos sitios y transectos donde se muestreo el material leñoso caído con la diferencia que la medición del mantillo se realizó en solo dos puntos por transecto con una separación de 2 y 4 m entre puntos (Figura 6).

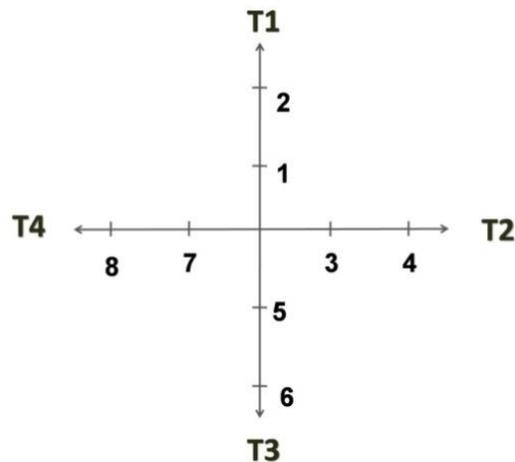


Figura 6. Puntos de muestreo 1 – 8 donde se levantan los datos y muestra.

Fuente: (INFyS, 2010).

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 hojas y 8 de humus) fueron colectados por sitio.

Se consideró a la capa de hojarasca como 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, 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 (materia orgánica completamente descompuesta y parcialmente descompuesta). Este horizonte es más compacto que el de hojarasca e incluyó generalmente una alta proporción de madera putrefacta. Para ello se utilizó un cuadrante de 30 por 30 cm² que delimitó el área de muestreo para cada punto señalado en la Figura 5. Se cuantificó el peso húmedo y seco del material recolectado en el área del cuadrante para cada uno de los puntos de muestreo. Para el secado de la muestra se utilizaron bolsas de papel estraza que contenía el material y se colocaron en estufa a 60°C durante 72 horas. Después de secar las muestras de biomasa, se pesó de manera separada cada uno de los componentes para cuantificar la acumulación de hojarasca y mantillo.

Para realizar el muestreo temporal (Figura 7), se instalaron un total de 48 trampas colectoras de estructuras vegetales de 0.50 m² colocadas aproximadamente a 1 m de altura del suelo, en el cual se distribuyeron cuatro canastas por cada sitio de muestreo, es decir una canasta por cada cuadrante del sitio.



Figura 7. Instalación de canastas colectoras de estructuras vegetales.

Cada mes se retiró el material recolectado en bolsas con sus respectivos rótulos para su posterior procesamiento.

Posteriormente las muestras se colocaron en bolsas de papel estraza y se introdujeron en la estufa de secado a 60 °C durante 72 horas hasta llegar al peso constante con la finalidad de calcular la cantidad de humedad. Luego se separó por hojas, ramas, flores, frutos y semillas (Figura 8). Cada uno de los componentes se pesó de manera separada para cuantificar la tasa de acumulación de hojarasca durante el periodo de un año (enero a diciembre de 2022).

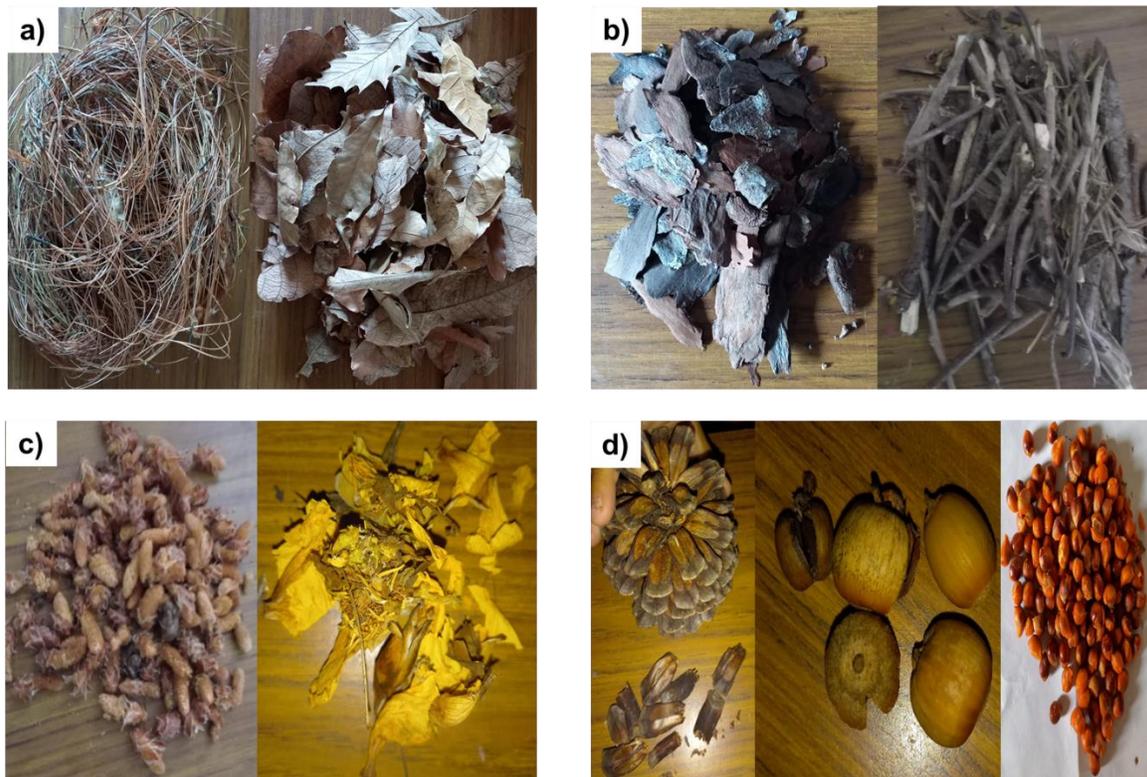


Figura 8. Estructuras vegetales recolectadas en un gradiente de elevación, en tres ecosistemas forestales. a) hojas y acículas, b) ramas, c) flores y d) semillas.

7.3. Determinación de Variables

7.3.1. Biomasa viva aérea

Se utilizaron ecuaciones alométricas disponibles usando el diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total y densidad de la madera (Ecuación 1 y 2). Los datos de densidad de la madera se obtuvieron de Zanne *et al.* (2009) y Ordoñez *et al.* (2015). Para ecosistemas de *Pinus oocarpa* y *Quercus* se utilizaron ecuaciones alométricas específicas de cada especie (Vargas-Larreta *et al.*, 2017); para el ecosistema de selva baja se usó una ecuación alométrica general (Cairns *et al.*, 2003) (Ecuación 3) con la corrección por especies específicas de densidad de madera (Urquiza-Haas *et al.*, 2007).

Pinus oocarpa

(Ecuación 1)

$$\begin{aligned} \text{AGB} = & 0.001753\text{DBH}^{1.8261}\text{H}^{1.28397} + 0.02898\text{DBH}^{2.08978} \\ & + 0.00948\text{DBH}^{2.7493} + 0.04163\text{DBH}^{1.93601} \end{aligned}$$

Quercus

(Ecuación 2)

$$\begin{aligned} \text{AGB} = & 0.01988\text{DBH}^{2.28684}\text{H}^{0.52175} + 0.05621\text{DBH}^{2.0764} \\ & + 0.11276\text{DBH}^{1.52164}\text{H}^{0.53343} \\ & + 0.0377\text{DBH}^{1.42193}\text{H}^{0.70675} \end{aligned}$$

Selva Baja

(Ecuación 3)

$$\text{AGB} = [\exp(-2.12605 + 0.8681\ln(\text{DBH}^2\text{H}))]\rho$$

Donde:

AGB= Biomasa aérea del árbol (kg ind⁻¹); DBH= Diámetro a la altura de pecho (cm);

H= Altura total del árbol (m); ρ=Densidad de la madera de cada individuo (g cm⁻³)

7.3.2. Biomasa viva en raíces

La biomasa viva en raíces se estimó utilizando las ecuaciones alométricas propuesta por Cairns *et al.* (1997):

(Ecuación 4)

$$BR = \exp(-1.085 + 0.956 \ln (AGB))$$

Donde:

BR= Biomasa de raíz (kg de peso seco); AGB= Biomasa viva aérea (kg de peso seco).

7.3.3. Material leñoso caído

El volumen de madera muerta se calculó usando la Ecuación 5 de acuerdo con Brown y Roussopoulos (1974) y Van Wagner (1982).

(Ecuación 5)

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

Donde:

V= Volumen de madera muerta ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); L= Longitud de la línea de muestreo (m) y d_i = 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^{-3} , 0.48 g cm^{-3} , 0.35 g cm^{-3} y 0.23 g cm^{-3} , respectivamente, para madera muerta (Gutiérrez *et al.*, 2010; Reyes *et al.*, 1992).

7.3.4. Estructuras vegetales recolectadas

Las estructuras vegetales recolectadas, las cuales se refieren a hojarasca, ramas, flores, frutos y semillas, se obtuvieron de acuerdo a la Ecuación 6 adaptada de acuerdo a (Honorio y Baker, 2010):

(Ecuación 6)

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

Donde:

EV= Estructura vegetal ($t \text{ ha}^{-1}$); PS= Peso seco (g) y A= Área de muestreo (m^2).

7.4. Análisis de datos

Con la ayuda de la base de datos elaborada en una hoja de Microsoft Excel, se analizó la información de producción de hojarasca y la suma total (hojas, flores, ramas y semillas). Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA, $p < 0.05$) de una vía para evaluar las diferencias significativas entre gradiente de elevación (tipo de vegetación) por mes. De igual manera, se evaluaron las diferencias significativas entre los meses de muestreo en cada ecosistema forestal. Por último, se aplicó la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para verificar las comparaciones múltiples.

8. Resultados

8.1. Densidad de arbolado

En la Figura 9 se puede observar el número de árboles por hectárea encontrados por cada ecosistema, numéricamente el ecosistema con mayor número de individuos por hectárea es el ecosistema de encino con 381 ± 87 árboles ha^{-1} , por el contrario, en el ecosistema de pino se encontró el menor número de individuos con 268 ± 87 árboles ha^{-1} . En análisis no se encontraron diferencias significativas entre ecosistemas.

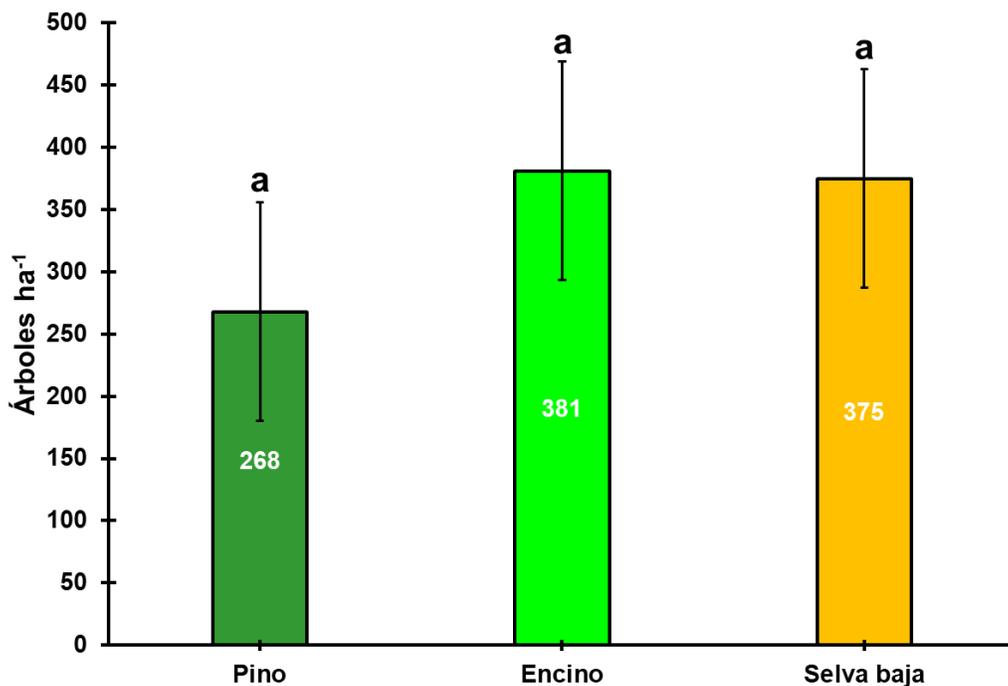


Figura 9. Número de árboles por hectárea en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. Las barras de error indican los respectivos intervalos de confianza 95%. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre ecosistema (Tukey $p = 0.05$).

8.2. Grosor de los árboles

Los ecosistemas bajo estudio son de suma importancia para su conservación ya que son clave en la captura de carbono de la atmosfera. Respecto al DAP, se encontró que en el ecosistema de pino el 50% de árboles que se contabilizaron en una hectárea presentaron diámetros de entre 7.5 - 30 cm y 50% mayores a 30 cm. El ecosistema de encino tiene el 85% de los árboles presentaba diámetros de entre 7.5 - 30 cm de DAP, el número de individuos reduce considerablemente en las categorías diamétricas >30 cm de DAP, con sólo el 15%. Asimismo, la selva baja presentó el 88% de árboles con diámetros entre 7.5 - 30 cm de DAP, también reduce los números de árboles en la categoría diamétrica >30 cm de DAP, con solo el 12% (Cuadro 2).

Cuadro 2. Número de árboles por hectárea de acuerdo con el Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas.

Ecosistema	Árboles por hectárea		
	>7.5 a 15 cm	>15 a 30 cm	>30 cm
Pino	19	112	131
Encino	187	137	56
Selva baja	212	156	6

8.3. Producción mensual de hojarasca

La producción mensual de hojarasca mostró diferencias significativas entre ecosistemas, aunque no ocurrió en algunos meses (Figura 10). Asimismo, hubo diferencias significativas entre meses de colecta por cada ecosistema. La producción más alta se presentó en el mes de enero en los ecosistemas de pino y

selva baja. En el ecosistema de encino la mayor producción se presentó en el mes de marzo, con $1.08 \pm 0.25 \text{ t ha}^{-1}$, mientras que la menor cantidad se encontró en el mes de julio con $0.11 \pm 0.03 \text{ t ha}^{-1}$. Para el caso del ecosistema de pino, la mayor producción de hojarasca se observó en los meses de enero y abril, con una media de 1.34 ± 0.19 y $0.74 \pm 0.13 \text{ t ha}^{-1}$ respectivamente. La menor cantidad se obtuvo en el mes de junio con $0.09 \pm 0.02 \text{ t ha}^{-1}$. Después, tiende a aumentar la producción de junio hasta noviembre $0.34 \pm 0.07 \text{ t ha}^{-1}$. La selva baja alcanzó la mayor producción en el mes de enero con $0.85 \pm 0.26 \text{ t ha}^{-1}$, con una tendencia en disminución al mes de junio, en el cual se obtuvo en promedio de $0.08 \pm 0.02 \text{ t ha}^{-1}$ pero de junio a noviembre tiende a aumentar la producción de $0.84 \pm 0.16 \text{ t ha}^{-1}$.

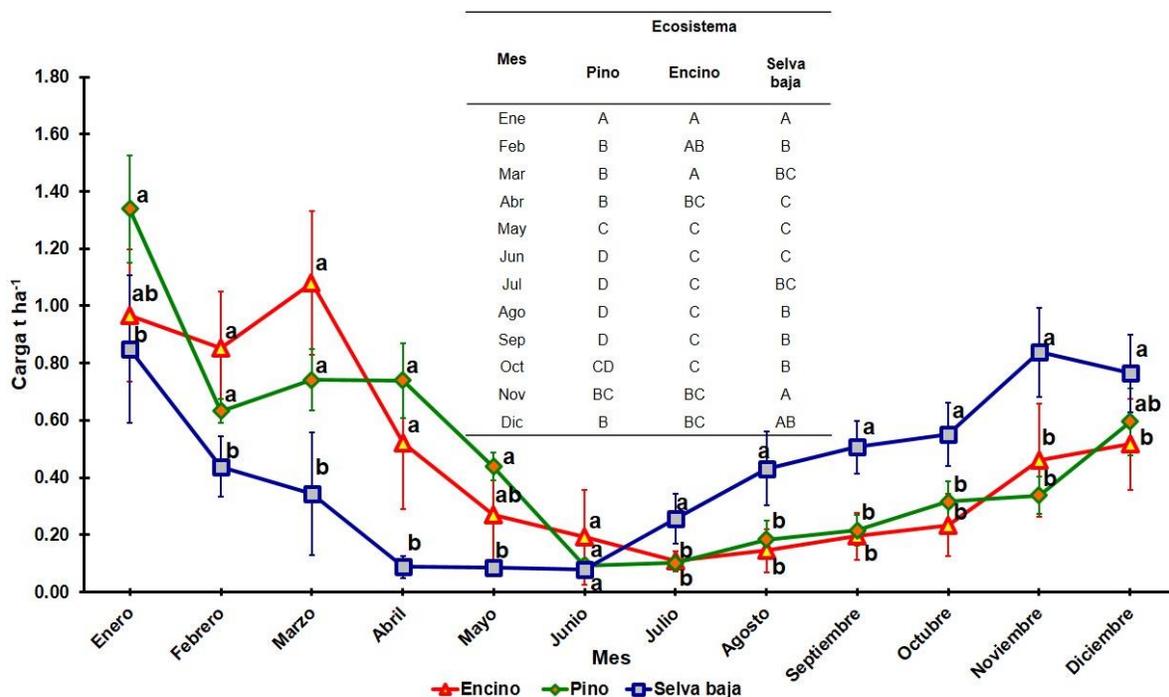


Figura 10. Producción mensual de hojarasca (t ha^{-1}) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. Las barras de error indican los respectivos intervalos de confianza 95%. Las letras mayúsculas en el cuadro superior indican diferencias significativas

entre los meses de colecta por ecosistema y las letras minúsculas indican diferencias significativas entre ecosistema por mes.

Las producciones mensuales totales de combustibles forestales (hojas + ramas + flores + semillas) mostraron diferencias significativas entre meses de colecta por cada ecosistema, pero no sucedió en todos los meses. De igual manera, hubo diferencia significativa entre ecosistemas por cada mes de colecta pero no fue así para todos los meses (Figura 11). Consistente con el comportamiento de hojarasca, los valores más altos se obtuvieron en el ecosistema de pino y selva baja en el mes de enero, a su vez, la mayor producción en el ecosistema de encino se observó en el mes de marzo. Los valores más bajos se encontraron en los meses de julio en los ecosistemas de pino y encino, mientras que, en la selva baja, fue en el mes de junio. Los resultados de caídas de combustibles forestales indicaron una variación significativa entre los tres ecosistemas forestales estudiados. La mayor caída de hojarasca en los ecosistemas de estudio fue en la temporada de sequía.

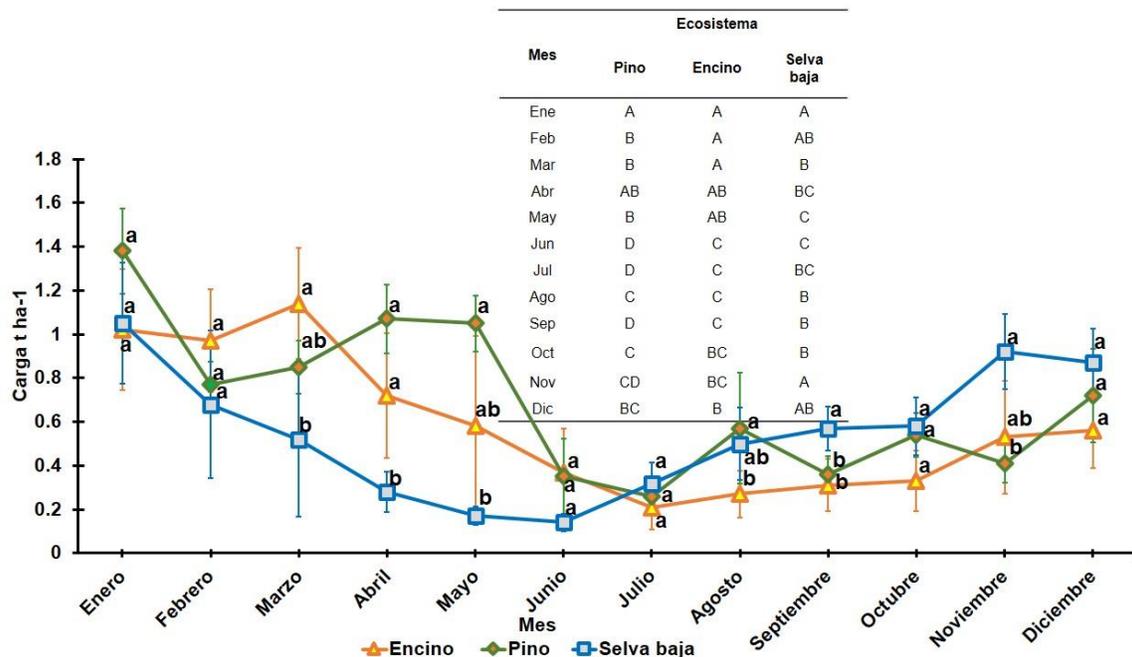


Figura 11. Producción mensual de combustibles forestales (hojas + ramas + flores + semillas, $t\ ha^{-1}$) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. Las barras de error indican los respectivos intervalos de confianza 95%. Las letras mayúsculas en el cuadro superior indican diferencias significativas entre los meses de colecta por ecosistema y las letras minúsculas indican diferencias significativas entre ecosistema por mes.

8.4. Carga de hojarasca y mantillo

La carga de hojarasca fue significativamente diferente entre el ecosistema de pino, encino y selva baja, pero no hubo diferencia significativa entre encino y selva baja (Tukey $p = 0.05$). A su vez, la mayor carga de hojarasca lo obtuvo el bosque de pino con $12.51 \pm 3.88\ t\ ha^{-1}$ (Figura 12a).

En lo que corresponde al mantillo, su almacén varió significativamente entre ecosistemas (Tukey $p = 0.05$). Las cargas mayores de mantillo se encontraron en los ecosistemas de pino y encino (Figura 12b).

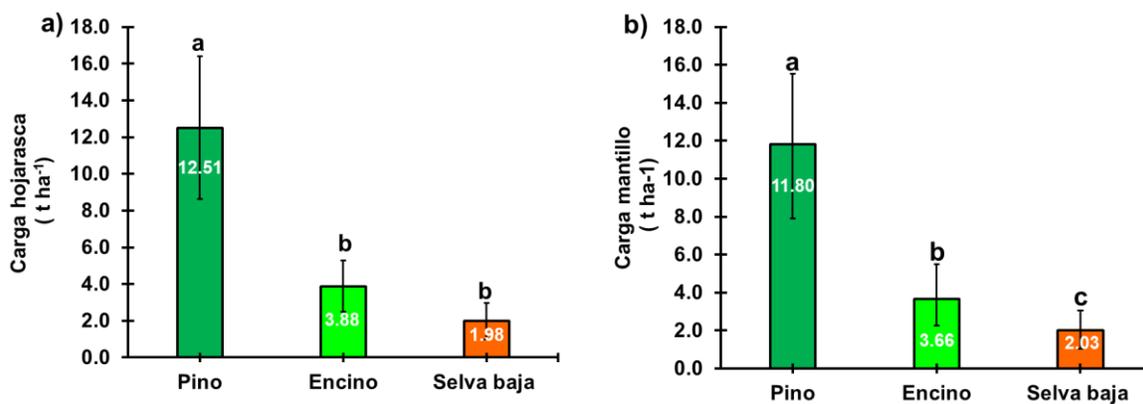


Figura 12. Almacenamiento de hojarasca y mantillo ($t\ ha^{-1}$) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. a) hojarasca; b) mantillo. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre ecosistema (Tukey $p = 0.05$). Barra de error, indican desviación estándar.

8.5. Carga de combustible forestal de 1, 10, 100 y 1000 horas

La carga de combustible forestal de material leñoso caído (MLC) de 1 hora de retardación (Figura 13I), presentó diferencia significativa entre el bosque de pino y encino. Numéricamente, se encontraron las mayores cargas en el bosque de pino y selva baja. En los materiales leñosos caídos de 10 horas se encontraron diferencias significativas solo en entre el ecosistema de pino y selva baja, con cargas de 1.00 y 0.73 t ha⁻¹ (Figura 13II).

Asimismo, en los MLC de 100 horas (Figura 13III), fueron significativamente diferentes entre el ecosistema de encino y selva baja, la mayor carga acumulada lo obtuvo la selva baja con 2.71 t ha⁻¹.

Los materiales leñosos caídos de 1000 horas no fueron significativamente diferentes entre ecosistema. Se encontraron las mayores cargas en el ecosistema de encino con 7.09 t ha⁻¹, seguido por la selva baja con 4.38 t ha⁻¹ (Figura 13IV).

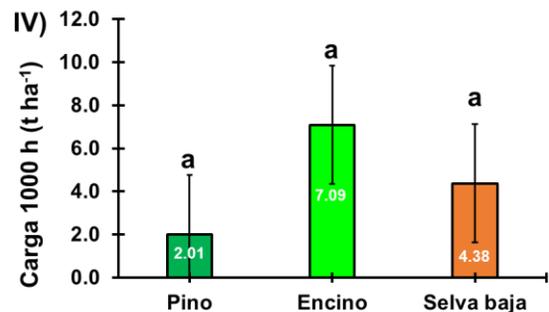
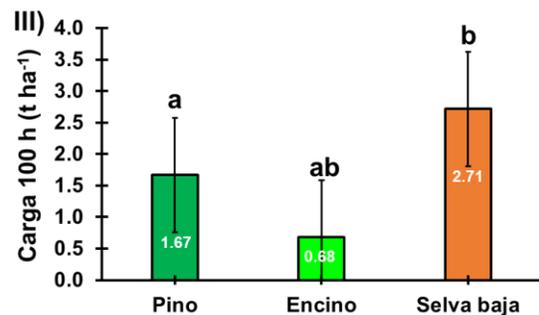
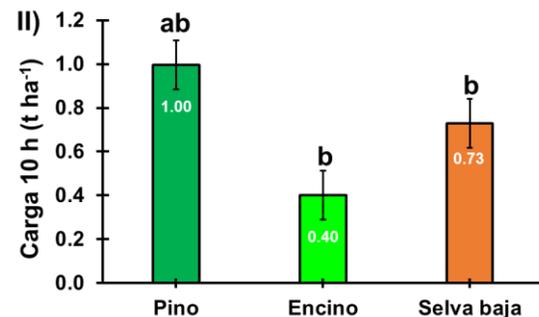
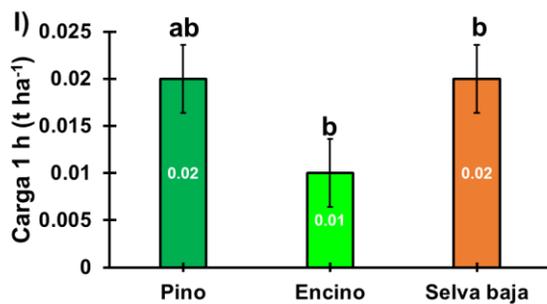


Figura 13. Almacenamiento de material leñoso caído ($t\ ha^{-1}$) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. I) MLC 1 h, II) MLC 10 h, III) MLC 100 h, IV) MLC 1000 h. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre ecosistema (Tukey $p = 0.05$). Barra de error, indica desviación estándar.

En la suma de almacenamiento total de material leñoso caído 1, 10, 100 y 1000 horas de retardación no fueron significativamente diferentes entre los ecosistemas de estudio. Las mayores cargas acumuladas se obtuvieron en el ecosistema de encino y selva baja (Figura 14).

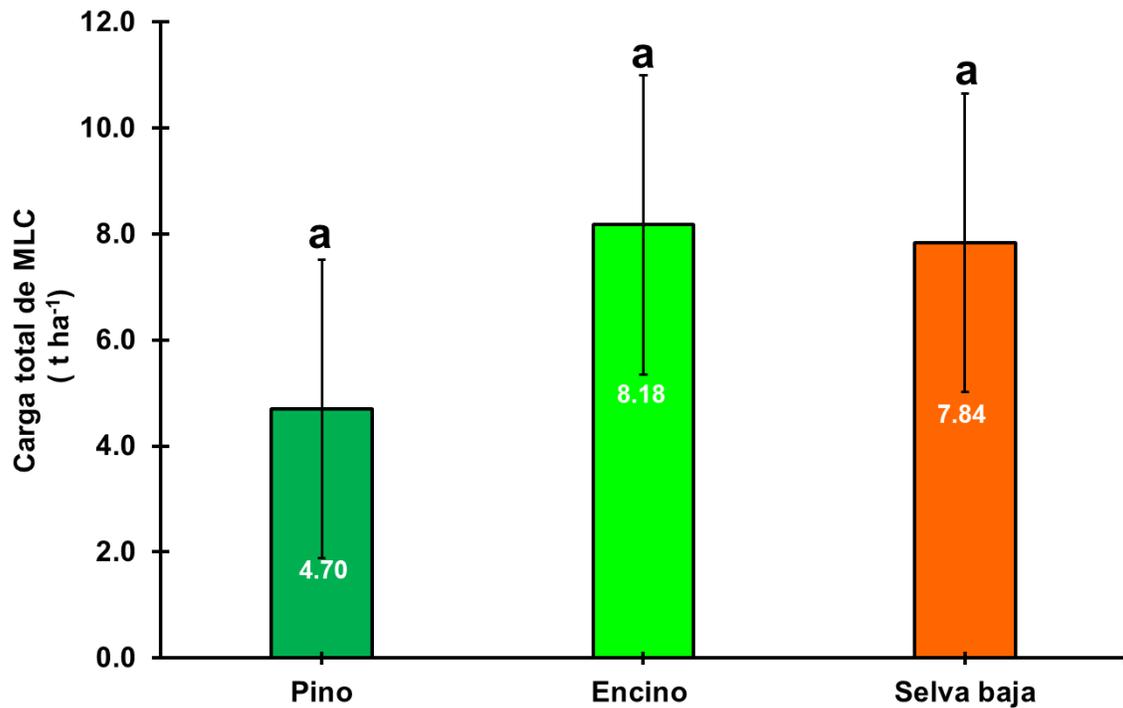


Figura 14. Almacenamiento total de material leñoso caído ($t\ ha^{-1}$) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre ecosistema (Tukey $p = 0.05$). Barra de error, indican desviación estándar.

8.6. Biomasa aérea y raíces

En el análisis precedente de almacenamiento en biomasa aérea, se encontró diferencia significativa en el ecosistema de pino y selva baja, en promedio los valores mayores se obtuvieron en el ecosistema de pino con 71.31 t ha^{-1} , mientras que en el ecosistema de encino se obtuvo 56.88 t ha^{-1} . En el caso de la selva baja, el valor fue de 14.94 t ha^{-1} , siendo el valor más bajo en comparación a los ecosistema de pino y encino (Figura 15a).

Por consiguiente, para el caso del almacenamiento de biomasa en raíces, los valores mayores se obtuvieron en los ecosistemas de pino y encino con 25.94 y 20.50 t ha^{-1} . En selva baja el valor fue mucho menor en comparación al ecosistema de pino y encino, obteniendo 6.31 t ha^{-1} . Se encontró diferencia significativa entre el ecosistema de pino y selva baja (Figura 15b).

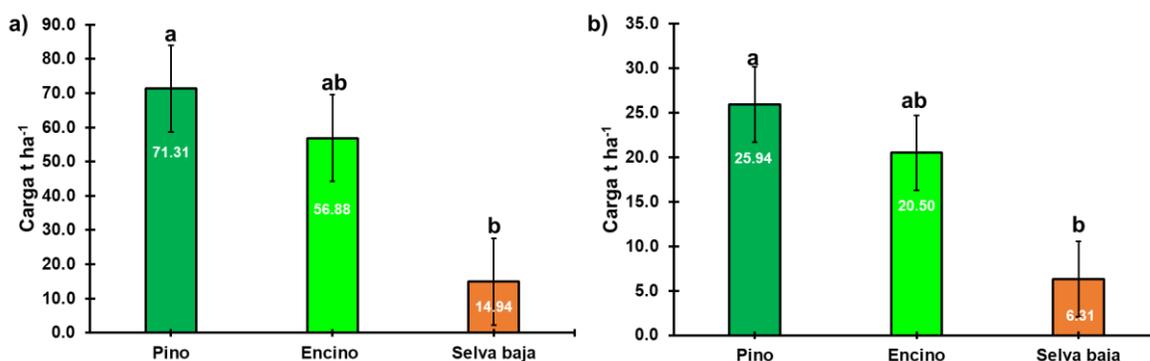


Figura 15. Almacenamiento de biomasa aérea y raíces (t ha^{-1}) en tres ecosistemas forestales del Cerro Nambiyugua, Villaflores, Chiapas. a) biomasa aérea; b) biomasa en raíces. Los puntos con misma letra indican que no hubo diferencia significativa entre ecosistema (Tukey $p = 0.05$). Barra de error, indican desviación estándar.

9. Discusión

9.1. Dinámica en densidad y grosor de árboles

De acuerdo con Ruiz (2017) en la misma zona de estudio pero en el ecosistema de pino, el número de árboles presenta una tendencia de disminución desde el año 2010 con 318 individuos por hectárea al 2022 en el que se encontraron 268 individuos por hectárea en el presente estudio. Lo anterior se debe a la alta acumulación de acículas obstruyendo el contacto de las semillas con el suelo, provocando que el ecosistema no se regenere y que por lo tanto aumente el número de árboles por hectárea. Además, la disminución en números de árboles por hectárea se debe al incendio forestal que se presentó en el año 2019 (Fernández, 2022).

Rodríguez *et al.* (2019) mencionan que el *Pinus oocarpa* es una especie adaptada al fuego, pero cuando el incendio es severo provoca una elevada mortalidad de los árboles, principalmente a los individuos jóvenes y de pequeñas dimensiones. En su estudio reportaron mortalidad de 48.8% en pino y 57.1% en árboles de encino con paso de incendio severo. La media de altura de la cicatriz del fuego sobre el tronco y chamuscado de copas alcanzaron 1.5 m y 68.7% (Cuadro 3). A su vez, la selva baja resiste o tolera un incendio forestal de baja intensidad y severidad, por lo que existen especies que presentan adaptaciones al fuego. Lo anterior justifica los resultados del presente estudio en el que se encontró numéricamente el mayor número de árboles por hectárea en el ecosistema de encino con 381 árboles por hectárea.

Cuadro 3. Características dasométricas de *Pinus oocarpa* vivos, antes y después del fuego.

Variable	Antes	Después
A (m)	8.5 ± 5.2	11.0 ± 5,2
DB (cm)	16.5 ± 12.6	23.2 ± 13.9
DN (cm)	13.0 ± 11.3	19.0 ± 12.3
AC (m)	3.4 ± 3.4	4.8 ± 4.0
GC (mm)	11.5 ± 6.7	14.0 ± 6.7
ACT (m)	1.5 ± 1.2	1.6 ± 1.4
Ch (%)	68.7 ± 37.0	38.8 ± 29.0

A= altura; DB= diámetro a la base; DN=diámetro normal; AC= altura a la base de la copa; GC= grosor de corteza; ACT= altura de la cicatriz sobre el tronco; Ch= chamuscado de copas Fuente: (Rodríguez, *et al.*, 2019).

Por otro lado, el estado natural de los ecosistemas bajo estudio muestra la mayoría de los árboles con categorías diamétricas entre 7.5-30 cm y van disminuyendo cuando alcanzan categorías comerciales. El número de árboles encontrados en la presente investigación es importante para que se mantengan los ecosistemas, aunque por perturbaciones antropogénicas principalmente, a lo largo del tiempo pueden cambiar por otras especies oportunas o nativas de la zona.

9.2. Producción mensual de estructuras vegetales

Las cifras encontradas en producción de hojarasca mensual en los ecosistemas estudiados coinciden en comparación a lo reportado por López-Hernández *et al.* (2022) en bosque de pino-encino en el estado de Nuevo León, México, quienes encontraron valores de 0.48 y 0.55 t ha⁻¹ mensual, respectivamente (Cuadro 4). Además, mencionan que del mes de enero a abril es el período donde la producción de hojarasca es mayor, lo cual, coincide con los resultados del presente estudio.

Cuadro 4. Producción anual de hojarasca en diferentes ecosistemas.

Producción anual	Ecosistemas forestales				
	Pino	Encino	Selva baja	Pino-Encino	Matorral espinoso
Hojarasca (t ha⁻¹ año⁻¹)	5.73	5.53	5.23	6.59	5.53

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del presente estudio y de López-Hernández *et al.* (2022).

La mayor producción de hojarasca en los ecosistemas de estudio fue en la temporada de estiaje, lo cual coincide con Martínez-Alonso *et al.* (2007) y por López-Hernández *et al.* (2022), quienes mencionan que el aumento de la temperatura, periodos de sequía, elevación, relieve, fisiología de las hojas intervienen en la producción de hojarasca en los ecosistemas forestales.

Desde una perspectiva más general, los valores encontrados de producción de hojarasca mensual en los ecosistemas estudiados, coinciden con lo reportado por Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009) en ecosistemas de encino, pino, pino-encino y pino-encino liquidámbar, parcelas bajo restauración forestal, en Chiapas, México, quienes encontraron mayor producción en el periodo enero-abril con un rango de 0.60 a 1.5 t ha⁻¹ por mes. Aryal *et al.* (2015) reportan para selva tropical semi-perennifolia, que los valores de producción de hojarasca mayores fueron durante febrero y marzo en el primer año de estudio y durante marzo a mayo en el segundo año. El patrón de producción de hojarasca del primer año de ese estudio es semejante con los resultados obtenidos en el presente estudio en el ecosistema

de encino, pero los picos de producción no coinciden con los demás ecosistemas forestales. Esto demuestra la necesidad de estudiar la producción de hojarasca a un largo plazo.

9.3. Almacenamiento de combustibles forestales

La acumulación de los combustibles forestales puede aumentar la carga con el paso de los años y por perturbaciones antropogénicas y naturales (Ruiz, *et al.*, 2022), por lo que el monitoreo continuo y el estado de sus funciones como la acumulación de carga a largo plazo son herramienta clave para realizar actividades de manejo de carga de combustibles, quemas prescritas, dinámica de nutrientes en el suelo y actividades microbianas (Cruz *et al.*, 2018; Ruiz *et al.*, 2022). A su vez, de acuerdo con Gould *et al.* (2008), los combustibles forestales son el único componente del triángulo del fuego que puede ser manipulado y dominado por el hombre.

Por otro lado, los resultados de este estudio han sido descritos por diferentes categorías realizadas en otros estudios publicados. Xelhuantzi *et al.* (2011) encontraron en Coahuila, Puebla, Baja California Sur, Jalisco, Yucatán y Quintana Roo cargas de 2.5 a 6 t ha⁻¹ en la capa de fermentación, hojarasca de 1.5 a 4 t ha⁻¹, MLC 1 h de 0.01 a 0.08 t ha⁻¹, 10 h de 0.05 a 1.09 t ha⁻¹, 100 h de 0.3 a 1.02 t ha⁻¹ y 1000 h de 0.00 a 0.12 t ha⁻¹, en bosques templados, selva mediana y selva alta, lo anterior coincide con lo encontrado en este estudio con los resultados de fermento, hojarasca, MLC de 1, 10 h, en los ecosistema de encino y selva baja, pero, por los valores altos encontrados, no coincide con el ecosistema de pino,. En los MLC de 100 y 1000 h, las cifras encontradas son superiores en el presente estudio en los tres ecosistemas analizados.

Asimismo, Chávez *et al.* (2016) reporta cargas totales de 119.20 t ha⁻¹ en ecosistema de coníferas y 92.49 t ha⁻¹ en ecosistema de encino en el estado de Jalisco, mientras que en el presente estudio se encontraron valores de 29.01 t ha⁻¹ en pino y 15.72 t ha⁻¹ en encino, posiblemente por el paso del incendio forestal ocurrido en el año 2019 hizo que disminuyera la cantidad de carga de combustibles. De la misma manera, las cifras encontradas de carga de hojarasca en encino y selva baja en el presente estudio coinciden con lo reportado por Cruz *et al.* (2018), quienes reportan cargas de 2.94 a 4.70 t ha⁻¹ en bosque templado de la Mixteca Alta, Oaxaca, México, pero los valores son relativamente bajos con los datos encontrados en el bosque de pino del presente estudio, sin embargo los resultados de MLC obtenidos fueron bajos a lo reportado del estudio antes mencionado donde obtuvieron cargas totales de 41.89 a 45.54 t ha⁻¹.

9.4. Reservorios de biomasa en arbolado

De acuerdo con López *et al.* (2018) señalan que los árboles de mayores dimensiones tanto en altura total, diámetro normal y edad, tienen mayor almacenamiento de biomasa que los árboles de porte pequeño y de corta vida. Lo anterior se presentó en los ecosistemas de pino y encino en el área de estudio, donde los árboles tienen mayores dimensiones y por ende se obtuvieron las cifras mayores de reservorio de biomasa aérea. En selva baja los valores obtenidos son menores debido a que la mayoría de los árboles son de talla pequeña.

Se ha verificado que los datos obtenidos de biomasa en el presente estudio coinciden con la publicado por Figueroa *et al.* (2010) quienes reportan valores de 45.91 a 184.03 t ha⁻¹ en bosques de *Pinus patula* y especies asociadas por área de

corte en bosques manejados de la Mojonera, Hidalgo.

Los resultados son similares a lo publicado en otros estudios en especies de coníferas, en la que a mayor diámetro y edad del árbol los valores de reservorio de biomasa aumentan (Figueroa *et al.*, 2010; Lim *et al.*, 2013). Además, la altura total y el diámetro normal de los árboles son variables clave para la determinación de biomasa, pero dada la dificultad de medición de altura de los individuos, se ha optado por la utilización de ecuaciones alométricas que utilice principalmente el diámetro normal de los árboles (Soriano *et al.*, 2015).

10. Conclusiones

La producción de combustibles forestales varía entre los ecosistemas que representan los gradientes de elevación en los cuales se observó el comportamiento de producción más alta en el mes de enero en los ecosistemas de pino y selva baja, en el ecosistema de encino la mayor producción se presentó en el mes de marzo. Respecto a la variación mensual, la mayor producción de combustibles forestales totales se registró en el periodo enero-abril para el caso de los tres ecosistemas. La tasa de producción y almacenamiento de combustibles forestales varió por la altura sobre el nivel del mar. La dinámica de producción de los combustibles forestales fue diferente entre meses del año 2022. Conocer los procesos, patrones y cantidades de almacenamiento 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 almacenamiento de combustibles forestales da pauta para realizar actividades de manejo del paisaje (quemadas prescritas, extracción y/o transformación de combustibles forestales) que pueden ser de gran

importancia en la regeneración natural. Estos resultados pueden ser útiles en reciclaje de nutrientes y cuantificación de almacenamiento de carbono, las cuales determinan realizar actividades de control y supresión de un incendio forestal.

11. Literatura citada

Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, por sus siglas en inglés, National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022). Proyecto POWER del Centro de Investigación Langley de la NASA (LaRC) financiado a través del Programa de Ciencias de la Tierra / Ciencias Aplicadas de la NASA. Fecha de consulta: 09 de mayo de 2022.

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Arellano, S., Vega, J. A., Ruíz, A. D., Arellano, A., Álvarez, J. G., Vega, D. J., y Pérez, E. (2017). Foto-guía de combustibles forestales de Galicia y comportamiento del fuego asociado. Andavira.

Aryal, D.R., De Jong B.H., Ochoa G. S., Mendoza V. J y Esparza O.L. (2015). Successional and seasonal variation in litterfall and associated nutrient transfer in semi-evergreen tropical forests of SE Mexico. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 103(1): 45-60.

Becker, J., Pabst, H., Mnyonga, J., y Kuzyakov, Y. (2015). Annual litterfall dynamics and nutrient deposition depending on elevation and land use at Mt. Kilimanjaro. *Biogeosciences*, 12(19), 5635-5646.

Bonilla P. E., Rodríguez T. D. A., Borja de la R. A., Cíntora G. C., y Santillán P.J. (2013). Dinámica de combustibles en rodales de encino-pino de Chignahuapan, Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(19), 21-33.

Brown, J.K, Roussopoulos, P.J. (1974). Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science* 20: 350-356.

- Brown, J.K. (1974). Handbook of inventorying downed woody material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 1-32.
- Cairns MA, Olmsted I, Granados J, Argaez J (2003) Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *For Ecol Manag* 186:125–132.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1–11.
- Cansler, C.A., Swanson, M.E., Furniss, T.J., Larson, A. J y Lutz, J.A. (2019). Fuel dynamics after reintroduced fire in an old-growth Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Fire Ecology*, 15(1), 1-17.
- Castañeda R.M.F., Endara A.A.R., Villers R.M.D.L y Nava B.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.
- Cepeda G.M.F., C. Lasch, J.O. Núñez, M. Morales y J. González (compiladores). (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.
- Chávez D. Á. A., Xelhuantzi C. J., Rubio C. E. A., Villanueva D. J., Flores L. H. E., y Mora O. C. D. L. (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*, 7(Número especial13), 2589-2600.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), Comisión Nacional Forestal (Conafor), Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USFS), CMF, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2012). Guía para la Elaboración de Programas de Manejo del Fuego en Áreas Naturales Protegidas y Sitios de Interés (Guía Rápida), México. 60 pp.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2012). Estudio Previo Justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida Área de Protección de Flora y Fauna “Cerro Nambiyugua”, en el Estado de Chiapas, México. 68 pág.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2010). Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. Zapopan, Jalisco. 56 pp.

Cruz, P.C., Juárez, W.S., Santiago, D.M., Santiago, O.L.C., Silva, E.R.P y Calderón, O.A.A. (2018). Combustibles Forestales y Susceptibilidad a Incendios de un Bosque Templado en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana*, 20(1), 9-14.

De Jong, B.H. (2013). Spatial distribution of biomass and links to reported disturbances in tropical lowland forests of southern Mexico. *Carbon Management*, 4(6), 601-615.

Díaz C. G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*. XXXVII (2), 227-240.

Fernandez Z.K.S. 2022. Dinámica del almacenamiento de carbono en un ecosistema de pino (*Pinus oocarpa* Schiede) en Villaflores, Chiapas. [Tesis

de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V.] 103 p.

Figuroa N., C. F., G. Angeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtán, Hidalgo. Rev. Mex. Cien. For. 1: 105-112.

Figuroa N.C.M., Ángeles P.G., Velázquez M.A., y Santos P.H.M.D.L. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. En Zacualtipán, Hidalgo. Revista mexicana de ciencias forestales, 1(1), 105-112.

Finiza, B. (2012). Cambio Climático y su Relación con los Ecosistemas de Incendios.

Flores G J., Wong G. J. C., y Paz P. F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. Madera y bosques, 24(e2401893). [https://doi:10.21829/myb.2018.2401893](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401893).

Gould W.A, González G, Hudak A.T, Hollingswoth T.N, Hollingswoth 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.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2021). Cambio Climático 2021: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra. 5p.

Gutiérrez V. B, Gómez C. M., V. M, 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 ex schltdl. Del estado de chiapas,

- México. Revista Fitotecnia Mexicana. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Chapingo, México 33 (4):75-78.
- Hernández G. J., Rodríguez O. G., Enríquez del V. J. R., Campos Á. G. V., y Hernández H. 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.
- Honorio E. N y Baker T. R. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Instituto de investigaciones de la Amazonia Peruana. Universidad de Leeds, 11, 945-958.
- Icela, R., Velázquez, R., Alzúa, L. V., Guevara Ortiz, E., Comisión, N., Forestal, B., José, C., Tovar, I., Roberto Martínez Domínguez, T. S. I., Arturo, R., Ramos, V., Paola, C., y Cabrera, E. (s/f). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Unam.mx. Recuperado el 3 de agosto de 2023, <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/159FASCCULOINCENDIOSFORESTALES.PDF>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1: 250,000, Serie V, DGG-INEGI, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Áreas Geoestadísticas Municipales, Junio 2018.', escala: 1:250000. edición:1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_htptcache%20=%20yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xml&_indent%20=%20no. Fecha de consulta 12 de junio de 2019.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union)', escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). 2010. Manual y Procedimientos para el muestreo de campo. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Guadalajara, Jalisco, México.
- Jardel, P. E. J., Quintero, G. S. D., Lomelí J. A. J., Graf, P. J. D., y Rodríguez, G. J. M. (2018). Generación de modelos de comportamiento del fuego para los tipos de combustibles forestales de México.
- Lam, A. J. (2010). El cambio climático y el desarrollo. *Ingeniería Industrial*, (28), 25-39.
- Lim, H., Lee K. H. y Park. I. H. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *J. For. Res.* 18: 316–322.
- López H.J. M., González R. H., Ramírez L.R.G., Cantú S. I., Gómez M. M. V., Pando M. M., y Estrada C. A. E. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, (35), 41-64.
- López L.S.F., Martínez T.T., Benavides M.H M., García N.M., y Ángeles P.G. (2018). Reservorios de biomasa y carbono en el arbolado de la primera sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México. *Madera y bosques*, 24(3).

- López-Hernández, J. M., H. González-Rodríguez., Cantú-Silval, M. V. Gómez-Meza., A. E. Estrada-Castillón., N. L. Contreras-Guajardo y J. I. del Valle-Arango. (2022). Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1): e2891. <https://doi:10.19136/era.a9n1.2891>.
- Lozano P. A., Alvarez M. C. E., y Moggiano A. N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <https://doi:10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Martínez V. J. L., Rodríguez T. D. A., Borja de la R. M., Amparo, M., y Rodríguez Y, G. A. (2018). Propiedades físicas y dinámica de los combustibles forestales en un bosque de encino. *Madera y bosques*, 24(2).
- Martínez-Alonso C., F. Valladares-Ros., J. J. Camarero, M. López-Arias., M. Serrano y J. A. Rodríguez. (2007). The uncoupling of secondary growth, cone and litter production by intradecadal climatic variability in a mediterranean scots pine forest. *Forest Ecology and Management* 253: 19-29.
- Morfin R. J. E., Jardel P. E. J, Alvarado C. E., y Michel F. J. M. (2012). Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 59p.
- Neger, C. (2021). Causas antrópicas de los incendios forestales en la sierra de los Tuxtlas, México. *Edgar Serna M.(Editor)*, 376.

- Neri P. A. C., Rodríguez T. D. A., y Contreras A. R. (2009). Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Universidad y ciencia*, 25(2), 121-132.
- Obando C. I., Hantson, S y Barragán B. D. C. (2022). Chispas, cambio climático y actividades humanas. El triángulo de fuego que está quemando nuestros ecosistemas. 1-6. [https:// doi:10.12804/dvcn_10336.37296_num6](https://doi:10.12804/dvcn_10336.37296_num6).
- Obeso, J.R., Laiolo, P. 2021. Cambio climático y variación de los ciclos vitales con la altitud. *Ecosistemas* 30(1): 2145. <https://doi: 10.7818/ ECOS.2145>
- Oelbermann, M y Gordon, A. M. (2000). *Quantity and quality of autumnal litterfall into a rehabilitated agricultural stream* (Vol. 29, No. 2, pp. 603-611). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Ordóñez D.J. A. B., Galicia N.A., Venegas M.N.J., Hernández T.T., Ordóñez D.M. D.J., y Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21(Número especial), 77-216.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2021). Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero. Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2020. Boletín No. 17 10p.

- Pleguezuelo, P.N., Romero, J.C.R., Aires, M.DM., y Anguita, L.P. (2015). Un paso más allá del triángulo y el tetraedro. El modelo QF7 para el conocimiento del fuego. *Dyna*, 90(1), 40-42 <https://doi.org/10.6036/7174>
- Pyne, S. J. (2019). *Fire: A brief history*. Segunda edición. University of Washington Press.
- Rentería A., J. B., Treviño G. E. J., Návar C. J. D. J., Aguirre C. O. A., y Cantú S. I. (2005). Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 11(1), 51-56.
- Reyes, Gisel, Brown, Sandra; Chapman, Jonathan; Lugo, Ariel E. (1992). Wood densities of tropical tree species. Gen. Tech. Rep. SO-89 New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 15 p.
- Rocha-Loredo, A. G., y Ramírez-Marcial N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 84: 1-12.
- Rodríguez T. D. A. (1996). *Incendios forestales*. Mundi Prensa-Universidad Autónoma Chapingo-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México, D.F. México. 640 p.
- Rodríguez T. D. A., Tchikoué, H., Cíntora G. C., Contreras A. R., y Rosa V. A. D. L. (2011). Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Agrociencia*, 45(5), 593-608.

- Rodríguez T.D.A., Martínez M.P., y Lara P.J.M. (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. <https://doi:10.5902/1980509833952>
- Rodríguez, D. A. (2014). Incendios de Vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia. Colegio de Postgraduados.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna., J. A, Martínez-Lara., P. J. y Cruz-López, J. D. (2020). Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sábana artificiales en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*. 68(2), pp. 641-654.
- Rubio C. E. A., González T. M. A., Benavides S. J. D. D., Chávez D. Á. A., y Xelhuantzi C. J. (2016). Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(Número especial 13), 2601-2614.
- Ruiz C. R. (2017). Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de Pino (*Pinus oocarpa* Schide) en el municipio de Villaflores, Chiapas. [Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V.] 85 p.
- Ruiz, C. R., Aryal D. R., Venegas S. A., Jerez R. D. O., Fernández Z. K. S., López C. S., López H. J. C., Peña A. B y Velázquez S. C. A. (2022). Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): e3253. <https://doi: 10.19136/era.a9n2.3253>.

- Santa R. I., Salazar, S., Leonardi, S., y Rapp, M. (2004). Nutrient pools to the soil through organic matter in several *Castanea sativa* Mill. coppices of Mountainous mediterranean climate areas. In *III International Chestnut Congress 693* (pp. 341-348).
- Secretaría de Energía (SENER). (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012-2026*. Sener, Gobierno Federal. México. 156 p.
- Soriano L. M. D. L. Á., Ángeles P. G., Martínez T. T., Plascencia E. F. O y Razo Z. R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.
- Urquiza-Haas T, Dolman P. M, Peres C. A. (2007). Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: effects of forest disturbance. *For Ecol Manag* 247:80–90.
- Van Wagner C. (1982). *Practical aspects of the line intersect method*. Canadian Forest Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River
- Vargas-Larreta B, López-Sánchez C. A, Corral-Rivas J. J et al. (2017). Allometric equations for estimation of biomass and carbon stocks in temperate forests of north-Western Mexico. *Forests* 8:269–289. <https://doi: 10.3390/f8080269>
- Wong G. J. C. y Villers R. M. L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (62), 87-103.
- Xelhuantzi C. J., Flores G. J. G., y Chávez D. Á. A. (2011). Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(3), 37-52.

- Zanne A. E, Lopez-Gonzalez G, Coomes D. A, Ilic J, Jansen S, Lewis S. L, Miller R. B, Swenson N. G, Wiemann M. C, Chave J. (2009). Data from: towards a worldwide wood economics spectrum. In: Dryad digital repository. Dryad, Durham. <https://doi:10.5061/dryad.234>
- Zhang, H., Yuan, W., Dong, W., y Liu, S. (2014). Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 20, 240-247.



FOREST LITTER PRODUCTION VARIES WITH SEASON AND ELEVATION GRADIENT IN CHIAPAS, MEXICO †

[LA PRODUCCIÓN DE HOJARASCA FORESTAL VARÍA CON LA ESTACIÓN Y EL GRADIENTE DE ELEVACIÓN EN CHIAPAS MÉXICO]

Roldan Ruiz-Corzo¹; Deb Raj Aryal^{2,3*}; Andrea Venegas-Sandoval¹; Emmanuel Díaz-Nigenda¹ and Carlos A. Velazquez-Sanabria^{4,5}

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Lib. Norte Pte. #1150. Col. Lajas Maciel. C.P. 29039. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Email: ruizc.roldan@gmail.com; andrea.venegas@unicach.mx;

emmanuel.diaz@unicach.mx

²CONACYT-UNACH, Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozucuaulla-Villaflores, km 84.5, CP. 30470. Villaflores, Chiapas, México. Email: deb.raj@unach.mx

³New Mexico State University, Agricultural Science Center, 2346 State Road 288 Clovis, NM 88010, USA

⁴Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozucuaulla-Villaflores, km 84.5, CP. 30470. Villaflores, Chiapas, México. Email: carlos.velazquez@unach.mx

⁵Biodiversidad, Medio Ambiente, Suelo y Agua, A.C., 2a Norte Oriente #62, CP. 30470, Villaflores, Chiapas, México.

* Corresponding author

SUMMARY

Background. Forest litterfall is a fundamental process of ecosystem nutrient cycling, also, it is a source of energy for the development and propagation of wildfire. Understanding the temporal dynamics of litter production and storage is critical for sustainable management and conservation of forest ecosystems. **Objective.** To quantify the monthly production and storage of forest litter in an elevation gradient. **Methodology.** We selected forest sites at three elevations: 670, 775, and 1010 masl, corresponding to pine, oak, and tropical lowland forest ecosystems in Nambiyugua hill, Chiapas, Mexico. Sixteen sampling sites with a radius of 11.28 m were established for tree measurements, and 48 litter traps of 0.50 m² were installed to collect monthly litterfall for a year. To sample ground litter eight 30 by 30 cm² quadrats were used in each site. The fallen woody material was measured with the planar intersection method. Litter samples were oven-dried at 60 °C for 72 h and separated into leaves and other plant parts. One-way ANOVA was used to test the significant differences between forests. **Results.** The highest total loads of litter and fallen woody material were obtained in the pine forests of upper elevation with 29.01 t ha⁻¹. The highest litter production was obtained in January and April, with a mean of 1.34 ± 0.19 and 0.74 ± 0.13 t ha⁻¹ respectively in pine forests. In the oak forest, the highest production occurred in March, with 1.08 ± 0.25 t ha⁻¹; while the lowland forest reached the highest production in January with 0.85 ± 0.26 t ha⁻¹, with a decreasing trend in June. **Implications.** Understanding the seasonal variability in litter production and forest fuel loads is crucial for forest productivity, carbon sequestration, and wildfire prevention. **Conclusions.** The production of forest fuels was different among the ecosystems representing the elevation gradients. The highest monthly production of litter was registered during the January-May period for the pine and oak ecosystems but in November - January in tropical lowland forests.

Key words: Forest ecosystems; biomass storage; litter production; fallen woody material; pine forests; tropical forests

RESUMEN

Antecedentes. La producción de hojarasca forestal es un proceso fundamental en el ciclo de nutrientes de los ecosistemas, además, es una fuente de energía para el desarrollo y propagación de incendios forestales. Comprender la dinámica temporal de la producción y el almacenamiento de hojarasca es fundamental para la gestión sostenible y la conservación de los ecosistemas forestales. **Objetivo.** Cuantificar la producción y almacenamiento mensual de hojarasca forestal en un gradiente de elevación. **Metodología.** Seleccionamos sitios forestales en tres elevaciones: 670,

† Submitted July 3, 2023 – Accepted November 14, 2023. <https://doi.org/10.56369/taaes.5053>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

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-Corzo¹ 
 Deb Raj Aryal^{2*} 
 Andrea Venegas-Sandoval¹ 
 Deysi O. Jerez-Ramírez¹ 
 Karla S. Fernández-Zúñiga³ 
 Susana del C. López-Cruz³ 
 Juan Carlos López-Hernández³ 
 Beatriz Peña-Alvarez³ 
 Carlos A. Velázquez-Sanabria³ 

¹Universidad 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.

²CONACYT-UNACH, Facultad de Ciencias Agronómicas, Carretera Ocozocauatla-Villafloraes, km 84.5, CP. 30470. Villafloraes, Chiapas, México.

³Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Carretera Ocozocauatla-Villafloraes, km 84.5, CP. 30470. Villafloraes, 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, Villafloraes, Chiapas con el método del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. En cada sitio, se utilizaron ocho cuadrantes de 30 x 30 cm² 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⁻¹. Después del incendio forestal del año 2019, la carga de hojarasca disminuyó a 5.67 t ha⁻¹, y para el 2021 aumento a 8.65 t ha⁻¹. 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, Villafloraes, Chiapas, with the National Forest and Soil Inventory method. At each site, eight 30 x 30 cm² 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⁻¹. After the forest fire in 2019, the litter load decreased to 5.67 t ha⁻¹, and by 2021 it increased to 8.65 t ha⁻¹. 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.