

Análisis comparativo de **camas de combustibles** forestales en un ecosistema de manglar

Comparative analysis of forest fuel beds in a mangrove ecosystem

Romeo de Jesús Barrios-Calderón¹, Dulce Infante Mata^{1,2}, José Germán Flores-Garnica^{3*}, Bernardus Hendricus Jozeph De Jong⁴, Claudia Monzón Alvarado⁴ y Susana Maza-Villalobos Méndez⁵

¹El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula. Tapachula, Chiapas, México.

²Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.

⁴El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Campeche. Lerma Campeche, Campeche, México.

⁵El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Tapachula. Tapachula, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia. flores.german@gmail.com

Resumen

La evaluación del complejo de combustibles forestales en bosques y selvas constituye un avance de suma importancia para la predicción, análisis y control de incendios forestales. Con el objetivo de caracterizar las camas de combustibles forestales en los manglares del sistema de humedales El Castaño, en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, se aplicaron mediciones en campo y técnicas de análisis de datos relacionales. Con ello se calcularon algunos índices para la estructura y composición de las camas de combustibles forestales. Se cuantificó la biomasa de combustibles vivos empleando ecuaciones alométricas; los combustibles muertos se evaluaron aplicando la técnica de intersecciones planares. En este estudio se definieron camas de combustibles forestales en cuatro tipos de manglar, siendo *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* las especies más importantes en términos de dominancia. Los combustibles de dosel en el manglar de *R. mangle* presentaron las cargas más

altas de biomasa ($266.67 \text{ t ha}^{-1} \pm 39.58 \text{ t ha}^{-1}$). Para los combustibles muertos, se observaron diferencias en la carga de 10 h, siendo mayor en el manglar de *L. racemosa* ($17.21 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.11 \text{ t ha}^{-1}$), lo cual representa mayor potencial para la propagación del fuego en periodos de sequía y alta temperatura. No se observaron diferencias en la carga total de combustibles muertos, por lo tanto, los cuatro tipos de manglar evaluados tienen la misma capacidad de acumular biomasa muerta. Los resultados obtenidos son fundamentales para definir el peligro de incendios.

Palabras clave: biomasa muerta, combustible forestal, comportamiento del fuego, peligro de incendios, potencial de ignición, turberas tropicales.

Abstract

The evaluation of the complex of forest fuels in forests and jungles constitutes an extremely important advance for the prediction, analysis and control of forest fires. With the objective of characterizing the fuel beds in mangroves of the El Castaño wetland system, La Encrucijada, Chiapas, field measurements were applied and relational data analysis techniques. With this, some indices were calculated for the structure and composition of the forest fuel beds. The biomass of live fuels was quantified using allometric equations; the dead fuels were evaluated applying the planar intersection technique. In this study beds of forest fuels were defined in four types of mangrove, with *Rhizophora mangle* and *Laguncularia racemosa* being the most important species in terms of dominance. Canopy fuels in the mangrove of *R. mangle* presented the highest loads, of biomass ($266.67 \text{ t ha}^{-1} \pm 39.58 \text{ t ha}^{-1}$). For dead fuels, there were significant differences in the fuel load of 10 h, being greater in the *L. racemosa* mangrove swamp ($17.21 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.11 \text{ t ha}^{-1}$), which represent the greatest potential for the

propagation of fire in periods of drought and high temperature. There were no differences in the total load of dead fuels; therefore, the four types of mangrove evaluated have the same capacity to accumulate dead biomass. The results obtained are essential to define the danger of fires.

Keywords: dead biomass, forest fuel, fire behavior, danger of fires, ignition potential, tropical peatlands.

Introducción

Los ecosistemas de manglares se distribuyen a lo largo de las costas en la mayoría de los trópicos y subtrópicos (Bouillon, Connolly y Lee, 2008); a nivel mundial existen 73 especies de mangles (Spalding, Kainuma y Collins, 2010). En México se distribuyen en forma regular: *Rhizophora mangle* L. (mangle rojo), *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn (mangle blanco), *Avicennia germinans* (L.) Stearn (mangle negro, madresal) y *Conocarpus erectus* L. (botoncillo) (Pennington y Sarukhán, 2005). Estas cuatro especies, en conjunto, cubren 7645 km² del territorio mexicano, representando 5% de la cobertura mundial de manglares (Hernández-Félix, Molina-Rosales y Agraz-Hernández, 2017). De manera general, los bosques de manglar o manglares constituyen una formación leñosa, densa, frecuentemente arbustiva o arborescente de 2 m a 25 m de altura (Díaz, 2011). Una de las zonas de manglar más importantes en México es la Reserva de la Biósfera La Encrucijada (Rebien) en el estado de Chiapas, en donde se encuentran manglares con una gran altura que el dosel alcanza más de 45 m (Tovilla *et al.*, 2007).

Los manglares desempeñan importantes funciones ecológicas, actúan como filtro de nutrientes y de contaminantes entre la tierra y el mar, contribuyen a la protección de la costa contra

huracanes (Vermaat y Thampanya, 2006), sostienen las pesquerías, son fundamentales en la estabilidad climática al ser los sumideros de carbono más eficientes en los trópicos (Duke *et al.*, 2007). Además de proveer múltiples servicios ecosistémicos (Bouillon, 2011), también favorecen al ciclo de vida de una gran diversidad biológica (Calderón, Aburto y Ezcurra, 2009). Sin embargo, a pesar de todos estos beneficios ecológicos, los bosques de manglares en el mundo están disminuyendo (Giri *et al.*, 2015). México se encuentra entre los 10 países que presentan una de las tasas de pérdida de manglares más altas del mundo con 2.1% anual (Food and Agricultural Organization [FAO], 2007). Una de las causas más importantes han sido los incendios forestales, originados principalmente por las actividades antrópicas, cuya ocurrencia y severidad se debe a la combinación del tiempo atmosférico, la topografía y el combustible forestal (Flores *et al.*, 2016).

El combustible forestal es uno de los factores más importantes, involucrado en los incendios forestales, el cual puede ser caracterizado por: i) carga, es decir la cantidad; ii) disponibilidad, como contenido de humedad y flamabilidad; y iii) distribución, su estratificación horizontal y vertical. La carga de combustible es clave en el comportamiento del fuego y sus efectos, modulan la intensidad y severidad del incendio (Belcher, 2013). Además, la propagación de los incendios depende de la distribución o estratificación de los combustibles presentes en cada asociación vegetal (Flores, 2001), determinados por el tipo de vegetación, su estructura y composición (Barrios-Calderón, 2015), los cuales tienen influencia en la cantidad de combustible disponible. Considerando la relevancia de los incendios forestales en el manglar y el alcance de la caracterización de las cargas de combustibles en la planeación de estrategias para la protección de los manglares contra incendios (Ottmar, Sandberg, Riccardi y Prichard, 2007), el estudio de estos temas es primordial en el manejo de los manglares y del fuego.

Existen varios enfoques para la evaluación de combustibles forestales (Amiro, Alexander, Flannigan y Wotton, 2001). Sin embargo, éstos no reconocen otros aspectos que son fundamentales para determinar el comportamiento y peligro de incendios. En este sentido, cobra relevancia el concepto de camas de combustibles forestales (CCF) que se centra en el arreglo y estratificación de componentes que caracterizan unidades del paisaje relativamente homogéneas, representan un ambiente único de combustión y determinan el comportamiento y los efectos potenciales del fuego (Riccardi *et al.*, 2007). No obstante, las CCF constituyen reservorios distintos de combustibles que pueden llegar a quemar en un incendio. De esta forma, las CCF caracterizan todo material combustible, en relación con su distribución espacial (vertical y horizontal), y su potencial para quemarse en un incendio (Sandberg, Ottmar y Cushon, 2001). A pesar de la relevancia de las camas de combustibles en la frecuencia y recurrencia de incendios en ecosistemas de manglares, hasta el momento no se cuenta con información suficiente sobre la cantidad, disponibilidad, continuidad y distribución de combustibles forestales en los manglares de México.

Objetivos

El objetivo del presente trabajo es caracterizar la cantidad de combustibles forestales de ecosistemas de manglar bajo el concepto de camas de combustibles forestales (CCF), en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada (Rebien), con el propósito de apoyar la estimación del peligro de incendios (propagación e impacto). La hipótesis establecida para el presente estudio señala que no existen diferencias, en términos de cantidad del combustible forestal, entre las CCF definidas para los manglares.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se realizó en los bosques de manglar de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada reconocida también como Sitio Ramsar No. 815. Específicamente en el sistema de humedales El Castaño, localizado en el municipio de Mapastepec, Chiapas ($15^{\circ} 16' 51'' - 15^{\circ} 17' 24''$ latitud Norte y $92^{\circ} 57' 18'' - 92^{\circ} 57' 58''$ longitud Oeste (Fig. 1).

El Castaño presenta un clima cálido-húmedo con lluvias abundantes en verano Am (w). Tiene una precipitación promedio anual de 2100 mm (1300 mm mínimo y 3000 mm máximo), con una distribución promedio de 150 días \pm 50 días de lluvia al año (Barrios-Calderón *et al.*, 2018). La temperatura media anual es de 28°C , incrementándose durante la temporada seca del año (diciembre a junio), prolongándose hasta julio y agosto (Barrios-Calderón, 2015).

Diseño de muestreo

Se usó un muestreo estratificado al azar, donde el criterio de estratificación fueron los cuatro tipos de manglar, dentro de los cuales se establecieron, en forma aleatoria, diferente número de unidades de muestreo (UM). Los cuatro tipos de manglar y su número de UM (indicado entre paréntesis) fueron: i) manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle* (seis), ii) manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa* (cuatro), iii) manglar dominante de *Rhizophora mangle* (nueve) y iv) manglar dominante de *Laguncularia racemosa* (cuatro) (Fig. 2). Se consideró manglar monoespecífico, independientemente de la especie, cuando la especie de mayor dominancia representó 80% o más de la densidad total en el sitio y como manglar dominante cuando la especie representó menos de 80% pero igual o más de 50% de la densidad total. Estos criterios de dominancia fueron tomados de un estudio previo de estructura y composición realizados en la misma zona de estudio (Tovilla *et al.*, 2007).

El total de UM en el área de estudio fue de 23, cada UM consistió en una parcela circular de 0.06 ha; superficie que es mayor a la propuesta en otros estudios para estos ecosistemas y para la evaluación de biomasa forestal (0.05 ha) (Kauffman, Donato y Adame, 2013; Barrios *et al.*, 2018). La superficie total inventariada fue de 1.38 ha (0.47%), de un total de 290 ha de manglar. En cada parcela circular también se realizó el inventario del arbolado (i.e. árboles, bejucos, lianas) con diámetro a la altura del pecho (DAP, a 130 cm de altura desde el suelo) \geq 2.5 cm.

Para todos los registros del arbolado, se tomaron datos de altura (desde el suelo hasta el final de la copa), DAP (para el caso de *R. mangle* se midió a 30 cm por encima de la última raíz). La cobertura de dosel se calculó a través de los diámetros de copa y siguiendo la fórmula para el área de una elipse: área de copa = π (eje a \times eje b) (Corella *et al.*, 2001), tomándose dos mediciones en las direcciones eje a: norte-sur y eje b: este-oeste. El cálculo de esta variable se hizo considerando 20% del arbolado total para cada sitio de muestreo. Dentro de cada UM se ubicó un subsitio circular concéntrico (0.006 ha), donde se registró la regeneración por las siguientes formas de crecimiento: árboles, herbáceas (i.e., especies no leñosas y no trepadoras) vasculares y no vasculares, arbustos (i.e., plantas leñosas, bejucos y lianas, con diámetro normal (DN) $<$ 2.5 cm). Para cada una de las plantas registradas se tomaron datos de DN, altura, cobertura e identidad taxonómica.

Características del rodal

En cada tipo de manglar se describieron a nivel rodal los diferentes atributos de la comunidad vegetal por formas de crecimiento: árboles (\geq 2.5 cm de DAP y \geq 2 m de altura), arbustos (\geq 2.5 cm de DAP y \geq 2 m de altura) y hierbas; además, se consideró el componente de

regeneración (i.e., plantas pequeñas < 30 cm de altura de árboles y arbustos). Mientras que el área de muestreo para árboles fue el de cada UM (0.06 ha), para los arbustos, hierbas y el componente de regeneración fue el de los subsitios circulares (0.006 ha) internos en cada UM.

Composición. Todos los registros, fueron identificados taxonómicamente. Para los árboles se obtuvo el número de registros por especie y se calculó su dominancia relativa (%) en cada UM. Para el caso de la regeneración, arbustos y herbáceas, en cada subsitio se consideró la abundancia de cada especie de acuerdo con la escala de cobertura/abundancia de Westhoff y Van Der Maarel (1978). Los datos obtenidos fueron utilizados para obtener la carga de combustibles, en función a la distribución y presencia de cada especie.

Densidad. El cálculo de la densidad (tallos ha^{-1}) para árboles se realizó utilizando la fórmula de Villavicencio y Valdez (2003):

$$D = n_i/N$$

donde:

D = Densidad de tallos por hectárea

n_i = número de tallos

N= superficie de la UM (0.06 ha)

La densidad de árboles (dosel superior y subdosel) obtenida en cada UM fue extrapolada a individuos por hectárea (ind. ha^{-1}). Estas densidades fueron agrupadas por clases de altura (estructura vertical) y clases diamétricas (estructura horizontal). En cuanto al sotobosque y a la vegetación de baja altura (arbustos y herbáceas) solamente se agrupó por especie.

Estructura. A partir de datos de DAP, y de acuerdo con Corella *et al.*, (2004), se definieron 10 categorías diamétricas (5 cm de amplitud). Para medir la altura se consideraron seis clases con amplitud de 5 m, incluyendo árboles a partir de 2 m de altura. En el sotobosque y la vegetación de altura baja (< 1.8 m), la caracterización de los estratos arbustivo y herbáceo se realizó en los subsitios establecidos, midiéndose aspectos como altura y DN.

Para dimensionar la composición estructural de las CCF se emplearon tres índices:

1) Índice de valor de importancia (IVI). Indica la importancia relativa de las especies, se expresa en porcentaje y se calculó de acuerdo con Villavicencio y Valdez (2003):

$$\text{IVI} = \text{Dr} + \text{Domr} + \text{Fr}$$

Donde:

Dr = densidad relativa (No. de individuos de una especie/número total de individuos de todas las especies) × 100 en un sitio de muestreo

Domr = dominancia relativa (área basal total de una especie/área basal total de todas las especies) × 100 en cada sitio de muestreo

Fr = frecuencia relativa (número de veces que aparece una especie/número total de ocurrencias de todas las especies) × 100

2) Índice de valor forestal (IVF). Para obtener este índice se usa la fórmula:

$$\text{IVF} = \text{DAPr} + \text{Ar} + \text{Cr}$$

Donde:

DAPr = dap relativo a 1.30 m (dap absoluto de una especie/dap absoluto de todas las especies) × 100. El dap absoluto refiere al dap promedio/10 000

Ar = altura relativa (altura absoluta de una especie/altura absoluta de todas las especies*100).

La altura absoluta corresponde a la altura promedio de la especie/10 000.

Cr = cobertura relativa de dosel fue obtenida utilizando la fórmula (diámetro de copa de todas las especies/área muestreada) + 100 (Zarco-Espinosa, Valdez-Hernández, Ángeles-Pérez y Castillo-Acosta, 2010).

3) Índice de complejidad de Holdridge (ICH). Determina la composición interna sobre continuidad horizontal y vertical de los combustibles, haciendo un análisis del desarrollo estructural en el que se encuentra cada CCF de los bosques de manglar y se calcula como:

$$ICH = (d*a*h*s)/1000$$

Donde:

d = número de árboles en la UM/0.1 ha

a = área basal total ($m^2/0.1ha$). Se calculó con la fórmula $\pi/4(DAP)^2$ (Ramos-Durón, Quiróz, Ramírez y Lot, 2004)

h = altura promedio del rodal (m)

s = número de especies totales de la UM

Caracterización de camas de combustibles forestales

En cada uno de los tipos de manglar se describen las CCF considerando capas, estratos, variables cualitativas y cuantitativas descritas en la tabla 1.

a) Combustibles de dosel

Dosel. La biomasa de los árboles de dosel superior se calculó a partir de la ecuación propia para cada especie (Tabla 2). Para el caso de la biomasa viva, se consideró 100% de la biomasa obtenida de la ecuación correspondiente. Para obtener la biomasa muerta de los árboles del dosel superior muertos en pie, se consideraron tres categorías de acuerdo con Adame *et al.* (2015): 1) muerto en pie con ramas y hojas, y recién muerto; se incluye el total de la biomasa calculada; 2) árbol muerto en pie con ramas pero sin hojas, se considera solamente 78.5% de la biomasa calculada; y 3) muerto en pie con fuste (i.e., sin ramas ni hojas), se considera solamente 23.4% de la biomasa total calculada.

Subdosel y combustibles de escalera. El subdosel (dosel inferior) y los combustibles de escalera (árboles < 2 m, lianas, bejucos, troncos y ramas caídas), fueron medidos aplicando las ecuaciones específicamente diseñadas para combustibles de dosel (Frormard *et al.*, 1998; Van Breugel, Ransijn, Craven, Bongers y Hall, 2011) (Tabla 2), empleadas para árboles con este tipo de dosel inferior. Esta categoría de combustibles se conforma por las clases de altura I (2 m - 7 m) y II (7.1 m a 12.5 m) principalmente.

b) Combustibles de superficie

Sotobosque. Para el caso de la regeneración, arbustos y herbáceas se midieron la altura total, cobertura foliar y DN al nivel de suelo. La biomasa de los árboles de menor tamaño (< 2 m de altura) de *R. mangle*, *L. racemosa* y *P. aquatica* se calculó aplicando las ecuaciones alométricas de la tabla 2.

Vegetación de baja altura. Para el caso de la herbácea *Crinum americanum* y el helecho *Acrostichum aureum* se emplearon las ecuaciones definidas en la tabla 2.

Material leñoso caído (MLC). Los combustibles leñosos en el suelo se evaluaron aplicando la técnica de intersecciones planares descrita por Brown (1974) y adaptada por Barrios-Calderón *et al.* (2018). En cada UM se distribuyeron cuatro líneas de intersección planar con longitud de 10 m. Las clases de MLC fueron analizadas y clasificadas en función al tiempo de retardo (TR) de los combustibles (1 h, 10 h, 100 h y 1000 h); el Tiempo de Retardo (TR) se refiere al tiempo promedio en que el combustible pierde o gana 66.6% de humedad, con respecto a las condiciones del ambiente. De acuerdo con Rodríguez-Trejo, Rodríguez, Fernández y Pyne (2002) el TR está relacionado con el diámetro de los combustibles que fueron medidos a diferentes intervalos de longitud de la línea de intersección planar, como se expresa en la figura 3.

Se aplicaron las fórmulas definidas por Brown (1974) adaptadas por Sánchez y Zerecero (1983) para obtener la carga de combustibles promedio en cada categoría diamétrica (Fig. 3); los resultados fueron expresados en toneladas por hectárea.

Hojarasca superficial (HS). La HS se evaluó a los 15 m de cada línea de intersección planar, teniendo con ello un total de cuatro cuadros ($0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$) en cada UM, es decir un total de 0.16 m^2 por UM (Fig. 3). Se midió la profundidad en los cuatro cuadros de esta capa de hojarasca (en cm) y se colectó el material contenido. Las muestras obtenidas se secaron a 105 °C por 24 h en una estufa de secado IKA OVEN 125, para establecer la relación con respecto al peso seco y obtener la carga para esta clase de combustibles muertos a partir de la densidad aparente y aplicando las fórmulas correspondientes.

c) Combustibles de suelo

Combustibles subterráneos. La hojarasca en fermentación (HF), determinada por un nivel medio de descomposición, fue separada de la HS en los cuadros de 0.04 m² y se procesó siguiendo el mismo protocolo de la HS. Adicionalmente, se consideró el mantillo orgánico (hojarasca y partículas completamente descompuestas) los cuales también fueron procesados de la misma manera.

La carga de combustibles de biomasa de raíces se obtuvo colectando cuatro muestras cilíndricas (4.5 cm de altura × 6 cm de diámetro = 127.23 cm³) de suelo por UM; cada muestra se separó en raíces superficiales (localizadas en los primeros 2 cm de profundidad) y raíces subterráneas (localizadas a una profundidad ≥ 2.5 cm); ambos componentes fueron secados a 75 °C y pesados en una balanza digital, hasta obtener el peso seco constante.

Análisis de datos

Con los datos estructurales y los modelos alométricos empleados, se calculó la carga de combustibles (t ha⁻¹) del dosel, subdosel y combustibles de escalera (biomasa aérea), las cuales se sumaron e integraron en un solo valor por especie y tipo de combustible para su análisis, permitiendo con ello obtener la cantidad de combustibles en un conjunto de componentes. Se realizó un análisis de varianza (Anova) para identificar diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre las CCF definidas para combustibles (vivos y muertos), incluyendo la hojarasca y combustibles del suelo; se usó la prueba *a posteriori* de Tukey-Kramer para conocer las categorías que fueron diferentes. Los análisis se realizaron en el programa JMP Pro 14 (Statistical Analysis System [SAS], 2018).

Resultados

Características del rodal

Composición. El estrato arbóreo de las CCF se conformó principalmente por dos especies: *R. mangle* y *L. racemosa*. También se encuentra asociada, en algunas zonas más cercanas a los canales de agua dulce, *Pachira aquatica* una especie característica de las selvas inundables y otra especie secundaria como *Zygia conzattii*. Las herbáceas encontradas fueron *Crinum erubescens* y *Crinum americanum* con alturas promedio de 1.2 m, diámetros de 0.74 m para *C. erubescens* y 0.31 m para *C. americanum*; helechos como *Acrostichum aureum*, con altura promedio de 1.67 m, con diámetros mayor y menor de 1.30 m y 0.75 m. El estrato arbustivo se conformó principalmente por plantas de *R. mangle* con alturas promedio de 0.88 m y diámetro promedio de 0.9 m, plantas de *L. racemosa* con altura promedio de 0.65 m y diámetro promedio de 0.5 m. También se encontraron plantas de *Z. conzattii* con alturas promedio de 1.2 m y diámetro de 0.6 cm. De manera general, las raíces de *R. mangle* tienen una altura media de 2.95 m y cobertura promedio de 19.4 m² ha⁻¹.

Densidad. La densidad media del arbolado presenta su tasa más alta en el MME-Lr con un promedio de 3078 individuos por hectárea y un área basal media de 30.36 m² ha⁻¹. El IVI y el IVF, muestran, de manera general, que las especies más importantes son *R. mangle* (en MME-Rm, MDom-Rm) y *L. racemosa* (en MME-Lr, MDom-Lr) (Tabla 3). La complejidad de la estructura vertical y horizontal fue más evidente en el MDom-Rm (ICH 53.57).

Estructura. La contribución por clases de altura a la carga de combustible fue diferente en cada tipo de manglar. El MME-Rm presentó su mayor porcentaje de la carga total de combustibles (19.9%) en la clase de altura > 27 m. Tanto que, el MME-Lr y MDom-Rm presentan su mayor acumulación de combustibles para la clase 17.1 a 22 m con porcentajes de

27.4% y 22.51% respectivamente (Fig. 4). El MDom-Lr tiene mayor densidad de árboles con DAP = 2.5 cm - 7.5 cm (557 ind. ha⁻¹), el MME-Lr con DAP = 7.51 cm - 12.5 cm (495 ind. ha⁻¹) y en el MDom-Rm dominan las clases diamétricas: (12.51-17, 17.51-22 y 22.51-27) cm, con 295 ind. ha⁻¹, 104 ind. ha⁻¹ y 38 ind. ha⁻¹, respectivamente (Fig. 5). Para las clases VI, VII, VIII, IX y X, la densidad de individuos es baja, sin embargo, es importante señalar que ésta se concentra principalmente en el MME-Rm, lo que indica que la especie *R. mangle* es influyente en el área basal y la carga de combustibles para este tipo de manglar.

Combustibles de dosel

Las cargas de combustibles mostraron diferencias significativas ($F_{3, 18} = 11.75$; $p = 0.0002$) entre los tipos de manglar, la mayor carga se observó en el Manglar mono específico de *Rhizophora mangle* (MME-Rm); mientras que los demás tuvieron una carga menor y no difirieron entre ellos (Tabla 4).

La figura 6 muestra la contribución de cada especie a las CCF en los diferentes estratos, encontrándose variaciones entre ellos.

De acuerdo con los resultados, la mayor carga promedio de *L. racemosa* se presentó en el Manglar mono específico de *Laguncularia racemosa* (MME-Lr; $130.34 \text{ t ha}^{-1} \pm 12.8 \text{ t ha}^{-1}$) y la menor a MME-Rm ($4.64 \text{ t ha}^{-1} \pm 2.81 \text{ t ha}^{-1}$). La especie *P. aquatica* muestra cargas relativamente bajas en todas las CCF. Esta aportó su mayor proporción en el Manglar dominante de *Rhizophora mangle* (MDom-Rm) con un promedio de $8.75 \text{ t ha}^{-1} \pm 4.39 \text{ t ha}^{-1}$, la cual es significativamente superior a las cargas que aportan en MME-Rm ($2.71 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.13 \text{ t ha}^{-1}$) y MMLr ($1.96 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.3 \text{ t ha}^{-1}$). Para el caso de las CCF del Manglar dominante de

Laguncularia racemosa (MDom-Lr) la cantidad de combustibles de dosel y subdosel fue de $3.97 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.6 \text{ t ha}^{-1}$. Esta acumulación de combustibles en algunas zonas puede tener una distribución similar a la del MDom-Rm ($8.75 \text{ t ha}^{-1} \pm 4.39 \text{ t ha}^{-1}$), mientras que en otras puede disminuir y tener cargas similares a MME-Rm ($2.71 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.13 \text{ t ha}^{-1}$). Por su parte, la especie *R. mangle* fue la que más aportó a la carga promedio de combustibles vivos, ésta presenta su carga mayor en el MME-Rm ($260.99 \text{ t ha}^{-1} \pm 39.01 \text{ t ha}^{-1}$), mientras que el MME-Lr es en la que menor aporte tiene esta especie ($4.37 \text{ t ha}^{-1} \pm 2.24 \text{ t ha}^{-1}$).

Combustibles de superficie

Sotobosque y vegetación de baja altura. Las herbáceas *Crinum americanum*, el helecho *Acrostichum aureum* y los briznales de las especies de manglar (*R. mangle* y *L. racemosa*) con DN < 2.5 cm, que conforman el estrato superficial de las CCF, aportan un porcentaje de combustibles de gran significancia. Por ejemplo, hasta $7.38 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$ en el MDom-Rm. La vegetación de baja altura mostró diferencias significativas, teniendo mayor acumulación en el MDom-Rm con respecto a MME-Lr y MDom-Lr (Tabla 5). La vegetación arbustiva no mostró diferencias significativas. La comunidad regenerativa presentó los valores más bajos en el estrato MME-Lr con respecto al resto. En términos generales, considerando todos los componentes, la carga promedio de combustibles fue mayor en el estrato MDom-Rm, seguido por MME-Rm, MDom-Lr y MME-Lr (Tabla 5).

Material leñoso caído (MLC). Se observaron diferencias significativas en los combustibles de la clase de 10h ($F_{3,18} = 6.19$, $p = 0.004$). La mayor carga se presentó en el MME-Lr, la cual difirió de los otros tipos de manglar (Tabla 6).

Combustibles no leñosos. Las cargas de estos combustibles no leñosos en sus diferentes clases, así como los combustibles de raíces y del mantillo, no presentaron diferencias significativas entre los tipos de manglar (Tabla 6).

Discusión

De manera general, las CCF estudiadas en los cuatro tipos de manglar no muestran variación en la diversidad de especies, dado a que regularmente se llegan a asociar de tres a cuatro especies de dosel y subdosel. Sin embargo, la estructura y la composición influyen en la combustibilidad de cada estrado de las CCF, principalmente cuando se da la frecuencia y dominancia de especies específicas como *R. mangle* que aporta gran cantidad de combustibles leñosos finos y medianos. Respecto a las características del rodal, tanto el IVI como el IVF permitieron referir la influencia de cada una de las especies encontradas con respecto a la acumulación de combustibles muertos (leñosos y hojarasca). Esto permite deducir cuanta variación puede ocasionar la dominancia de una u otra especie de mangle, reflejada en la cantidad de combustibles muertos generada.

En el presente estudio se rechaza la hipótesis planteada, la cual señala que no existen diferencias en el contenido de combustibles entre las CCF encontradas en los tipos de manglar evaluados, esto debido a que se presenta variación en las cargas de algunos estratos y componentes entre tipos de manglar. Los manglares evaluados presentan una estratificación compleja en el dosel y subdosel, donde el MME-Rm presenta mayor carga de combustibles de dosel, siendo la especie *R. mangle* la de mayor aporte a la biomasa de los combustibles de dosel, con un promedio de $260.99 \text{ t ha}^{-1} \pm 39.01 \text{ t ha}^{-1}$. Al comparar los resultados con los de otros autores, para el tipo de MME-Rm, este valor es muy similar a los 303.5 t ha^{-1} calculados

por Adame *et al.*, (2015) en Zacapulco, pero mayor a la obtenida en Santa Chila (198.8 t ha^{-1}) y menor que la evaluada en Esterillo (621.3 t ha^{-1}) y Las Palmas (706.6 t ha^{-1}) dentro de la Rebien.

Algunas investigaciones, como las realizadas por Bouillon *et al.* (2008), Komiyama, Ong y Poungparn (2008), Donato *et al.* (2011), Kauffman, Heider, Cole, Dwire y Donato (2011) y Adame *et al.*, (2013, 2015), destacan el gran potencial de biomasa que tienen los manglares debido a su alta productividad. En el presente estudio, la especie de mayor contribución a los combustibles leñosos (principalmente de 1 h y 10 h) es *L. racemosa*. Con la influencia de estas especies en los diferentes estratos de las CCF, se presentaron diferencias significativas entre las cargas de combustibles vivos (de dosel), mientras que las cargas totales de combustibles muertos (leñosos y totales) no presentaron diferencias significativas. Para el caso de los combustibles leñosos, en estudios previos dentro de la Rebien, Adame *et al.* (2015) encontraron cargas de MLC en un intervalo de 11 t ha^{-1} a 205 t ha^{-1} , mientras que Barrios-Calderón *et al.* (2018), registraron cargas promedio de $152.39 \text{ t ha}^{-1} \pm 42.6 \text{ t ha}^{-1}$ en un manglar mixto de *R. mangle* asociado a *P. aquatica*. Estos últimos valores presentan una desviación estándar similar a la encontrada en el MME-Rm, MME-LR y MDom-Lr. Mientras que en las CCF de MME-Rm, las cargas promedio de combustibles leñosos es de $124.05 \text{ t ha}^{-1} \pm 49.62 \text{ t ha}^{-1}$ en otras zonas de El Castaño (Adame *et al.*, 2015). Este valor se encuentra dentro del intervalo de la carga total de material leñoso obtenido en este estudio ($132.38 \text{ t ha}^{-1} \pm 36.67 \text{ t ha}^{-1}$); sin embargo, las $88.81 \text{ t ha}^{-1} \pm 10.5 \text{ t ha}^{-1}$ en los MME-Rm obtenidas por Barrios-Calderón *et al.*, (2018) en la localidad Río Arriba de la Rebien, son inferiores a las encontradas en la presente investigación, lo cual indica la variabilidad en la cantidad de combustibles leñosos en los manglares de esta zona.

Los combustibles finos de 1 h y 10 h son los principales responsables de iniciar la ignición. Al ser los que presentan mayor flamabilidad, pierden más fácilmente su humedad y tienen mayor disponibilidad e influencia a la dispersión del fuego (Flores, 2001). Mientras que los combustibles de 10 h constituyen el puente de comunicación con la hojarasca disponible, los combustibles medianos (100 h) y gruesos (1000 h) son los que intensifican el fuego (Flores, 2001). Ante esto, los resultados obtenidos en la presente investigación muestran diferencias significativas para la clase de combustibles de 10 h. Las mayores acumulaciones se presentaron en el MME-Lr ($17.21 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.11 \text{ t ha}^{-1}$), esta cantidad de combustibles de 10 h es superior a la que mencionan Barrios *et al.*, (2018) para un MME-Rm en Río Arriba Salvación ($13.65 \text{ t ha}^{-1} \pm 1.57 \text{ t ha}^{-1}$). En términos de peligro de incendios el MME-Lr representa un mayor potencial para el desprendimiento de calor, ante condiciones similares de vientos, sequía y temperatura con respecto a los otros tipos de manglar. Si se toma en cuenta lo señalado por Rodríguez-Trejo (2015) referente a que el incendio inicia en los combustibles finos (1 h y 10 h), podemos definir que la presencia de la especie *L. racemosa* da mayor certidumbre del inicio del fuego en los manglares. Por su parte, los combustibles medianos y gruesos son muy peligrosos para el desarrollo y propagación del fuego dando lugar a incendios de mayor intensidad (Flores, 2001). En efecto, los cuatro tipos de manglar evaluados tienen valores similares en la cantidad de combustibles medianos y gruesos, es decir, presentan la misma probabilidad de propagación de fuegos superficiales.

Por otra parte, es importante resaltar que la vegetación de arbustos y herbáceas del MDom-Rm tiene mayor carga de combustibles superficiales ($7.38 \text{ t ha}^{-1} \pm 0.6 \text{ t ha}^{-1}$) y, por lo tanto, representan el mayor potencial para la continuidad horizontal e impacto del fuego. Entonces, los combustibles muertos en combustión fungen como factores de ignición de los

combustibles vivos, habitualmente a través de hierbas y arbustos, que sirven como escalera en el paso del fuego (Chávez *et al.*, 2016). De esta manera, los incendios superficiales se convierten en incendios aéreos (de dosel) cuando se presenta un puente de comunicación entre los combustibles superficiales y los combustibles de dosel, desde la superficie del piso del bosque hacia el subdosel y dosel superior, permitiendo la propagación de incendios de gran impacto. Este escenario puede ser posible en el MDom-Rm que presenta la mayor carga de combustibles de sotobosque y vegetación de baja altura; aunque para definir la influencia que pueden llegar a tener los combustibles de escalera, es importante conocer la estructura vertical de las CCF (Flores *et al.*, 2016) en los cuatro manglares evaluados. Ante esto también es importante la continuidad vertical que presentan los combustibles vivos y ésta se puede interpretar mediante uno de los índices estructurales calculados en el presente estudio, como es el índice de complejidad de Holdridge. Este índice denota la alta complejidad del rodal, debido a que depende del aporte de altura, DAP y cobertura promedio de cada una de las especies encontradas. La altura promedio del rodal es un valor incidente en la complejidad y cuando no existe demasiada variación, el ICH es menor. Por ello a medida que el ICH sea más complejo, la continuidad vertical del fuego se ve favorecida, dado a que se presenta la estratificación de clases de altura para los combustibles de escalera. Por lo tanto, el MDom-Rm que tiene porcentaje más alto del ICH (53.57%) es el que exhibe mayor variación en las clases de altura, y por ende mayor continuidad vertical para la propagación del fuego.

Los resultados presentados también muestran que el MME-Rm y MDom-Lr tienen mayor porcentaje de biomasa de arbolado para las clases de 2 m - 7 m y 7.1 m - 12 m de altura, que son los que forman la escalera para llegar al dosel y subdosel. Al respecto, Rodríguez-Trejo, Ramírez, Kichohué y Santillán (2008) enfatizan que la disposición de estos árboles jóvenes

con ramas bajas, además de arbustos y agujas secas colgantes (i.e. lianas deshidratadas) favorece al incendio, de manera que se incrementa la altura de la llama. Con ello estos dos tipos de manglar también denotan una continuidad vertical deseable para el fuego y un gradiente de conectividad estructural de combustibles superficiales y aéreos, convirtiéndose en los más potenciales para que el fuego superficial llegue a los combustibles de dosel.

Respecto al comportamiento del fuego subterráneo, no se presentan diferencias significativas en la cantidad de HF y mantillo orgánico para los cuatro tipos de manglar, por lo que se considera que todos tienen un alto potencial para originar incendios subterráneos. Los valores promedio de la profundidad de mantillo orgánico muestran diferencias significativas, teniendo la mayor capa de mantillo en el MME-Rm. Es por esta razón que los MME-Rm son los que mayormente desarrollan este tipo de incendios silenciosos que penetran por debajo del subsuelo, llegando a quemar las raíces de los árboles y que originan alta mortalidad.

De acuerdo con esta serie de resultados surge la necesidad de incrementar el número de investigaciones orientadas al estudio de las CCF y su caracterización en los ecosistemas de manglar. Existe poca información al respecto y ha hecho falta redirigirla al estudio del comportamiento del fuego y peligro de incendios. Aunque los resultados se limitan a una escala regional, se recomienda dar seguimiento a este tipo de investigaciones a escalas mayores para definir la presencia, frecuencia e intensidad de incendios en este tipo de ecosistemas, en los que el papel del combustible forestal y las CCF constituyen la información básica.

Conclusiones

Se encontró variación en la carga de combustibles de algunos estratos de las CCF evaluadas en los cuatro tipos de manglar. Los combustibles de dosel presentaron diferencias significativas en las que el MME-Rm muestra las cargas mayores. Para la vegetación de arbustos y herbáceas el MDom-Rm tiene mayor carga de estos combustibles superficiales, representando con ello el mayor potencial para conducir el fuego superficial con mayor impacto. Dicho impacto del incendio también se ve favorecido en el MME-Rm y MDom-Lr, dado a que tienen mayor porcentaje de biomasa de arbolado para las clases de 2 m - 7 m y 7.1 m - 12 m de altura, que son las que forman la escalera para llegar al dosel y subdosel.

Para los combustibles leñosos no se presentan diferencias en el contenido total, sin embargo, existe variación en la clase de combustibles de 10 h con mayor carga en el MME-Lr. Este tipo de mangle manifiesta el potencial más alto de propagación de incendios superficiales, bajo condiciones óptimas para la ignición. Por su parte, el MME-Rm muestra mayor peligro de incendios subterráneos, debido a que presenta una capa de HF y mantillo orgánico superior en los tipos de manglar evaluados. Es importante señalar que en términos estructurales y de acumulación de biomasa, la especie de mayor importancia en las CCF evaluadas fue *Rhizophora mangle*. Los resultados ayudarán a definir áreas prioritarias con tendencia a una óptima asignación de recursos y asegurar un menor impacto de incendios en los ecosistemas de manglar. La simulación del comportamiento del fuego juega un papel importante tanto en la definición de estrategias de prevención, como en las actividades de control de incendios. Sin embargo, para su implementación se requiere conocer las cantidades y variaciones espaciales

de las cargas de combustibles, para lo cual la definición de las CCF genera información relevante.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca No. 429018 otorgada al primer autor para la realización de los estudios de Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. Al posgrado de El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula por la formación académica del primer autor y por facilitar el uso de su infraestructura. Al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) que administra la Reserva de la Biósfera La Encrucijada y a la comunidad El Castaño, Mpio. de Mapastepec, Chiapas, por las facilidades prestadas para la realización del trabajo de campo. Y finalmente a los técnicos académicos de Ecosur: Biol. José Rubén García Alfaro e Ing. José Higinio Urbina por sus contribuciones en campo y gabinete.

Referencias

- Adame, M. F., Kauffman, J. B., Medina, I., Gamboa, J. N., Torres, O., Caamal, J. & Herrera-Silveira, J. A. (2013). Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. *PLoS ONE*, 8(2), e56569. doi: 10.1371/journal.pone.0056569
- Adame, M. F., Santini, N. S., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L. & Guevara, M. (2015). Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, 12(12), 3805-3818. doi: 10.5194/bg-12-38052015
- Amiro, B. D., Alexander, B., Flannigan, M. & Wotton, M. (2001). Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian Boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4), 405-413. doi: 10.1071/WF01038

Barrios-Calderón, R. J. (2015). *Combustibles forestales y su relación con incendios en humedales costeros de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas*. Tesis de maestría, El Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas, México.

Barrios-Calderón, R. J., Infante-Mata, D., Flores-Garnica, J. G., Tovilla-Hernández, C., Grimaldi-Calderón, S. J. & García Alfaro, J. R. (2018). Woody fuel load in coastal wetlands of the La Encrucijada Biosphere Reserve, Chiapas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 339-357. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.12.068

Belcher, C. M. (2013). *Fire phenomena and the Earth system: an interdisciplinary guide to fire science*. Chichester West Sussex, England: Wiley-Blackwell.

Bouillon, S. (2011). Carbon cycle: Storage beneath mangroves. *Nature Geoscience*, 4(5), 282-283. doi: 10.1038/ngeo1130

Bouillon, S., Connolly, R. & Lee, S. Y. (2008). Organic matter exchange and cycling in mangrove ecosystems: Recent insights from stable isotope studies. *Journal of Sea Research*, 59(1-2), 44–58. doi:10.1016/j.seares.2007.05.001

Brown, J. K. (1974). *Handbook for inventorying downed woody material*. General Technical Report INT – 16. Utah, USA: USDA Forest Service.

Calderón, C., Aburto, O., & Ezcurra, E. (2009). El valor de los manglares. *Biodiversitas*, 82, 1-6.

Chávez, D. Á., Xelhuantzi, C. J., Rubio, C. E., Villanueva, D. J., Flores, L. H., & de la Mora, O. C. (2016). Caracterización de cargas de combustibles forestales para el manejo de reservorios de carbono y la contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (7)13, 2589–2600. doi: 10.29312/remexca.v0i13.485

Corella J., F., Valdez H., J. I., Cetina A., V. M., González C., F. V., Trinidad S., A. & Aguirre R., J. (2001). Estructura forestal de un bosque de mangle en noreste del estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México*, 26(90), 73-102.

Díaz G., J. (2011). Una revisión sobre los manglares: características, problemáticas y su marco jurídico. Importancia de los manglares, el daño de los efectos antropogénicos y su marco jurídico: caso sistema lagunar de Topolobampo. *Ra Ximhai*, 7(3), 355-369.

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. doi: 10.1038/ngeo1123

Duke, N. C., Meynecke, J. O., Dittman, S., Ellison, A. M., Anger, K., Berger, U., Cannici, S., Diele, K., Ewel, K. C., Field, C. D., Koedam, N., Lee, S. Y., Marchand, C., Nordhaus, I., & Dahdouh (2007). A world without mangroves? *Science*, 317(5834), 41-42. doi: 10.1126/science.317.5834.41b

Food and Agricultural Organization [FAO] (2007). *The world's mangroves 1980-2005*. Forestry paper, 153. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Flores G., J. G. (2001). *Modeling the spatial variability of forest fuel arrays*. Disertación doctoral, Dept. For. Sc. Colorado State University.

Flores G., J. G., Benavides S., J. D., Leal A., H. J., Vega M., D. G., Ramírez, V. C. & Casillas D., U. D. (2016). *Descripción de variables para definición de Peligro de Incendios Forestales en México*, Núm.3. Inifap-Cirpac, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 58 p.

Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Marty, Betoulle, J. L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: New data from French Guiana. *Oecologia*, 115(1-2), 38–53. doi: 10.1007/s004420050489

Giri, C., Jordan, L., Sawaiid, A., Mani M. R., Faisal, Q. M., Pengra, B., & Thau, D. (2015). Distribution and dynamics of mangrove forest of Suoth Asia. *Journal of Environmental Management*, 48, 101-111. doi:10.1016/j.jenvman.2014.01.020

Hernández-Félix, L., Molina-Rosales, D., & Agraz-Hernández, C. (2017). Servicios ecosistémicos y estrategias de conservación en el manglar de Isla Arena. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 14(3), 427-449. doi: 10.22231/asyd.v14i3.644

Kauffman, J. B., Heider, C., Cole, T. G., Dwire, K. A., & Donato, D. C. (2011). Ecosystem Carbon Stocks of Micronesian Mangrove Forests. *Wetlands*, 31(2), 343-352. doi: 10.1007/s13157-011-0148-9

Kauffman, J. B., Donato, D. C., & Adame, M. F. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares*. Documento de trabajo 117. Bogor, Indonesia: CIFOR.

Komiyama, A., Ong, J. E., & Poungparn, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany* 89(2), 128-137. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.006

Morfin Ríos, J. E., Jardel Peláez, E. J., Alvarado Celestino, E. & Michel-Fuentes R. (2012). *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Guadalajara, Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara.

Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Riccardi, C. L., & Prichard, S. J. (2007). An overview of the fuel characteristic classification system-quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(12), 2383-2393. doi: 10.1139/X07-077

Pennington T. D. & Sarukhán, C N. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies*. México D. F.: UNAM.

Ramos-Durón, F. J., Quiróz F, A. J., Ramírez G., J. P. & Lot, H. A. (2004). *Manual de hidrobotánica: Muestreo y análisis de la vegetación acuática*. México: AGT Editor.

- Riccardi, C. L., Ottmar, R. D., Sandberg, D. V., Andreu, A., Elman, Kopper, E. K., & Long, J. (2007). The fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research* 37(12), 2394- 2412. doi:10.1139/X07-143
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2015). *Incendios de vegetación: su ecología, manejo e historia* (2a ed.). Guadalajara, Jalisco, México: Biblioteca Básica de Agricultura, México.
- Rodríguez-Trejo., D. A., Rodríguez A. M., Fernández S. F., & Pyne, S. J. (2002). *Educación e incendios forestales* (2^a ed.). México, D.F: MundiPRensa.
- Rodríguez-Trejo, D., Ramírez, M., Tchikoué, H., & Santillán, P. J. (2008). Factores que inciden en la siniestralidad de incendios forestales. *Revista Ciencia Forestal en México*, 33(104), 37–58.
- Sánchez, C. J. & Zerecero, L. G. (1983). *Método práctico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca*. México: CIFONOR- INIF- SFF - SARH.
- Sandberg, D. V., Ottmar, R. D., & Cushon, G. H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire* 10, 381–387. doi: 10.1071/WF01036
- Spalding, M., Kainuma, M., & Collins, L. (2010). *World Atlas of Mangroves*. Londres, Reino Unido: Earthscan.
- Statistical Analysis System (SAS Institute Inc.). (2018). JMP 14. Statistical discovery from SAS. Cary, NC, USA: Author.
- Tovilla H., C., De la Presa P., J. C., Salas R., R. L., Romero-Berny, E. I., Ovalle E., F., Gómez O., R., Hernández S., J., Cruz M., E. & Hernández G., A. (2007). Inventario forestal de los bosques de manglar de Chiapas y Oaxaca. Primer informe. Ecosur/Conabio. Tapachula, Chiapas, México. 117 p.

van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D., Bongers, F., & Hall, J. S. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1648–1657. doi:10.1016/j.foreco.2011.07.018

Vermaat, J. E. & Thampanya, U. (2006). Mangroves mitigate tsunami damage: A further response, *Estuarine Coastal Shelf Science*, 69(1-2), 1-3. doi: 10.1016/j.ecss.2006.04.019

Villavicencio, E. L. & Valdez, H. J. (2003). Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en San Miguel, Veracruz, México. *Agrociencia* 37(4), 413-423.

Westhoff, V. & van der Maarel, E. (1973). The Braun-Blanquet Approach. En R. H. Whittaker (Ed.), Ordination and Classification of Communities (pp. 617-626). Dordrecht: Dr. W. Junk.

Zarco-Espinosa, V. M., Valdez-Hernández, J. I., Ángeles-Pérez J., & Castillo-Acosta, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea en el Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 26(1), 1-17.

Tabla 1. Variables que caracterizan una cama de combustibles forestales (modificado de Sandberg *et al.*, 2001; Riccardi *et al.*, 2007; Morfin Ríos, Jardel Peláez, Alvarado Celestino y Michel-Fuentes, 2012).

Capas	Estrato	Componentes	Variables	
			Cualitativas	Cuantitativas
Combustibles de dosel	1a) Dosel	Árboles vivos y árboles muertos en pie.	* Estratificación y continuidad vertical del dosel * Presencia de combustibles de escalera (conectividad entre combustibles de dosel y superficiales) * Tipo de copas * Estado de los árboles muertos en pie * Especies dominantes * Presencia de lianas, bejucos y plantas epífitas en troncos y ramas de los árboles * Cobertura y continuidad horizontal	* Altura media del dosel (m) * Cobertura del dosel (%) * Altura de árboles vivos y muertos (m) * Densidad de árboles ($N\ ha^{-1}$) * Diámetro Normal (DN) de árboles vivos o muertos (cm). * IVI, IVF, ICH. * Carga ($t\ ha^{-1}$)
	1b) Subdosel y combustibles de escalera	Árboles vivos y muertos en pie de menor tamaño, lianas o bejucos, en troncos y ramas de los árboles.		
Combustibles de superficie	2) Sotobosque	Arbustos, hierbas de gran tamaño y renuevo de especies arbóreas en el sotobosque.	* Estratificación y continuidad vertical * Tipo de hierbas (altas o de baja altura) * Hábito de crecimiento (anuales, perennes) * Potencial de aceleración (inflamabilidad) * Cobertura y continuidad horizontal	* Altura (m) * Cobertura (%) * Proporción de combustible vivo y muerto (%) * Densidad de arbustos ($N\ ha^{-1}$) * Carga ($t\ ha^{-1}$) * humedad en combustibles vivos (%)
	3) Vegetación de baja altura	Pastos, hierbas y subarbustos.		
	4) Material leñoso caído (MLC)	Troncos leños y ramas, MLC firme, MLC podrido, tocones.	*Densidad de MLC en clases de tamaño por tiempo de retardación (1, 10, 100, 1000 y $>1\ 000$ horas) *Nivel de putrefacción *Apilamientos de residuos	*Carga por clase de tamaño y nivel de putrefacción ($t\ ha^{-1}$) *Profundidad (m) *Densidad, número de piezas por grado de putrefacción > 1000 h ($N\ ha^{-1}$) *Diámetro (cm)
	5) Hojarasca superficial (HS)	Hojarasca, cubierta de plantas rasantes o postradas.	*Tipo de hojas (latifolias, caducas y otros tipos de material en la hojarasca como restos leñosos, semillas, propágulos, etc.) *Cobertura y continuidad horizontal *Densidad (suelta, compacta o apelmazada) *Profundidad *Acumulación de hojarasca en la base de los árboles.	*Carga ($t\ ha^{-1}$) *Cobertura (%) *Profundidad (cm)
Combustibles de suelo	6) Combustibles subterráneos	Hojarasca en fermentación (HF), humus y raíces.	*Densidad (suelta, compacta o apelmazada) *Presencia de suelos orgánicos y tipo de humus *Raíces finas superficiales, raíces en pudrición y troncos podridos enterrados	*Carga ($t\ ha^{-1}$) *Profundidad (cm) *Proporción de MLC en descomposición (%)

Tabla 2. Ecuaciones alométricas empleadas para calcular la carga de combustibles vivos (árboles, arbustos, herbáceas y regeneración) de las especies más abundantes en cada estrato.

Estrato	Especie	Ecuación	Fuente
CDos	<i>Rhizophora mangle</i>	$0.1282 \times D_R^{2.6}$	Fromard et al. (1998)
	<i>Laguncularia racemosa</i>	$0.1023 \times DAP^4$	Frormard et al. (1998)
	<i>Pachira aquatica</i>	$-2.514 + 2.295 \times \ln DAP$	Van Breugel et al. (2011)
CSup	<i>Rhizophora mangle</i>	$0.1282 \times D_R^{2.6}$	Fromard et al. (1998)
	<i>Laguncularia racemosa</i>	$0.1023 \times DAP^{2.4}$	Fromard et al. (1998)
	<i>Pachira aquatica</i>	$-2.514+2.295 \times (\ln DAP)$	Van Breugel et al. (2011)
	<i>Acrostichum aureum</i>	$-1.8027+ (1.0219 \times DNs)$	Barrios-Calderón (2015)
	<i>Crinum americanum</i>	$24.79 + (101.370 \times Cob)$	Barrios-Calderón (2015)

CDos = combustibles de dosel; Csup = combustibles de superficie; D_R = diámetro por encima de la raíz de apoyo más alta; DAP = diámetro a la altura del pecho (i.e., a 1.30 m de altura respecto al suelo); DNs = diámetro normal (al nivel del suelo); Cob = cobertura foliar.

Tabla 3. Parámetros de las principales especies de las CCF de manglar.

CCF	Especie	DA	AB	DR	DoR	FR	IVI	IVF	ICH
MME-Rm	<i>R. mangle</i>	911	19.1	87	91.77	37.5	216.27	152	31.41
	<i>L. racemosa</i>	78	1.15	7.43	5.54	37.5	50.47	92	
	<i>P. aquatica</i>	58	0.56	5.57	2.68	25	33.25	56	
	Total	1047	20.81	100	100	100	300	300	
MME-Lr	<i>L. racemosa</i>	2828	28.72	91.88	94.59	42.86	229.33	215	35.84
	<i>R. mangle</i>	239	1.21	7.76	4	42.86	54.62	85	
	<i>P. aquatica</i>	11	0.43	0.36	1.41	14.29	16.06	--	
	Total	3078	30.36	100	100	100	300	300	
MDom-Rm	<i>R. mangle</i>	717	12.95	57.85	75.93	33.3	161.18	127	53.57
	<i>L. racemosa</i>	217	3.23	17.49	14.73	33.3	68.28	72	
	<i>P. aquatica</i>	300	2.31	12.81	24.22	25.93	62.62	76	
	<i>Z. conzattii</i>	6	0.01	0.21	0.45	7.41	7.91	25	
	Total	1133	17.04	1001	100	100	300	300	
MDom-Lr	<i>L. racemosa</i>	1488	13.22	65.5	62.37	36.36	164.24	119	38.31
	<i>R. mangle</i>	679	6.83	29.91	32.21	36.36	98.48	82	
	<i>P. aquatica</i>	104	1.15	4.59	5.42	37.27	37.28	99	
	Total	2271	21.2	100	100	100	300	300	

CCF = cama de combustible forestal; DA = densidad absoluta (ind. ha^{-1}); AB = área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$); DR = densidad relativa; DoR = dominancia relativa; FR = frecuencia relativa; IVI = índice de valor de importancia; IVF = índice de valor forestal; ICH = índice de complejidad de holdridge. MME-Rm = manglar mono específico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr = manglar mono específico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm = manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr = manglar dominante de *Laguncularia racemosa*.

Tabla 4. Carga promedio de combustibles de dosel en diferentes estratos.

Tipo de manglar	Carga ($t\ ha^{-1}$)
MME-Rm	266.67 \pm 39.58a
MME-Lr	135.38 \pm 14.16b
MDom-Rm	191.47 \pm 43.91b
MDom-Lr	150.34 \pm 23.05b

Los valores indican promedio \pm desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

MME-Rm= manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr= manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm= manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr= manglar dominante de *Laguncularia racemosa*.

Tabla 5. Análisis de varianza de la carga de combustibles del sotobosque y vegetación de baja altura presente en las CCF.

Componentes	MME-Rm	MME-Lr	MDom-Rm	MDom-Lr	Estadísticos	
					p	F
Herbáceas	2.08 \pm 0.64b	0.06 \pm 0.1c	3.71 \pm 0.54a	0.175 \pm 0.18c	<0.0001	67.01
Arbustos	0.21 \pm 0.32	0.07 \pm 0.12	0.51 \pm 0.40	0.33 \pm 0.19	0.05	2.97
Regeneración	2.5 \pm 0.58a	1.33 \pm 0.39b	3.16 \pm 0.37a	2.74 \pm 0.44a	<0.0001	12.71
Total	4.8 \pm 0.76b	1.46 \pm 0.44d	7.38 \pm 0.6a	2.92 \pm 0.34c	<0.0001	96.47

MME-Rm = manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr = manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm = manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr = manglar dominante de *Laguncularia racemosa*. Los datos indican valor promedio \pm desviación estándar, en $t\ ha^{-1}$. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Tabla 6. Valores promedio de la carga de combustibles (\pm D.E.) obtenido en las CCF ($t\ ha^{-1}$).

Clase	MME-Rm	MME-Lr	MDom-Rm	MDom-Lr	P	$F_{3/18}$
<i>Combustibles leñosos</i>						
1h	2.96 \pm 1.13	5.45 \pm 1.02	3.86 \pm 1.66	5.19 \pm 1.42	0.05	3.04
10h	9.57 \pm 2.99b	17.21 \pm 1.11a	11.13 \pm 2.37b	11.20 \pm 2.90b	0.004	6.19
100h	36.28 \pm 7.78	54.61 \pm 22.23	38.57 \pm 16.18	40.54 \pm 17.45	0.40	1.02
1000h/firme	14.39 \pm 3.69	16.38 \pm 7.20	12.25 \pm 3.27	8.87 \pm 1.80	0.08	2.64
1000h/podrido	69.18 \pm 26.58	82.92 \pm 29.12	51.86 \pm 19.44	59.16 \pm 29.70	0.26	1.41
Total	132.38 \pm 36.67	176.58 \pm 60.52	117.68 \pm 31.44	124.98 \pm 47.57	0.20	1.66
<i>Combustibles no leñosos (Hojarasca y mantillo)</i>						
HS	12.27 \pm 8.05	9.59 \pm 8.86	8.45 \pm 7.38	9.17 \pm 4.39	0.33	0.79
HF	14.30 \pm 6.08	8.53 \pm 4.90	9.44 \pm 6.79	13.65 \pm 8.89	0.93	0.44
Mantillo orgánico	64.22 \pm 6.24	56.88 \pm 18.37	50.73 \pm 13.45	50.39 \pm 20.24	0.30	1.29
Total	90.8 \pm 12.02	75 \pm 12.06	68.62 \pm 6.96	73.21 \pm 10.44	0.27	1.40
<i>Combustibles de raíces</i>						
Raíces	3.1 \pm 0.94	3.56 \pm 2.3	3.87 \pm 2.08	3.12 \pm 0.74	0.78	0.35
<i>Profundidad de mantillo cm \pm D.E</i>						
Prof. de mantillo	38.57 \pm 6.49a	30.76 \pm 11.98ab	24.95 \pm 8.67b	27.3 \pm 8.42ab	0.04	3.19

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$). MME-Rm = manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr = manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm = manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr = manglar dominante de *Laguncularia racemosa*.

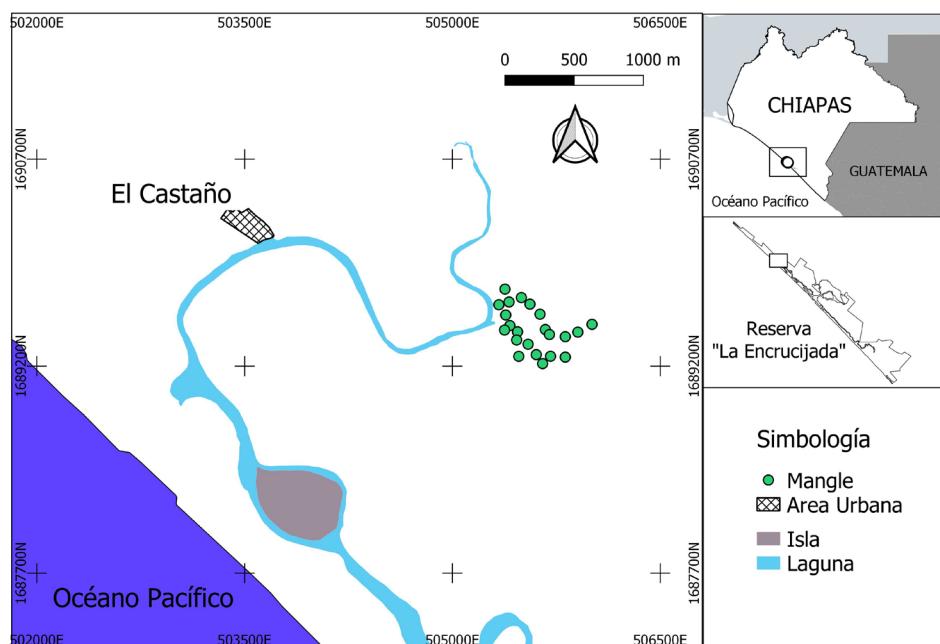


Figura 1. Localización del sistema de humedales El Castaño, dentro del polígono de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, México.

El círculo indicado en el mapa de Chiapas señala la Rebien; el rectángulo señalado en el polígono de la reserva indica el sistema de humedales El Castaño; los puntos indican las unidades de muestreo establecidas.



Figura 2. Tipos de manglar en El Castaño, Mapastepec, Chiapas.
a) manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle*; b) manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa*; c) manglar dominante de *Rhizophora mangle*; d) manglar dominante de *Laguncularia racemosa*.

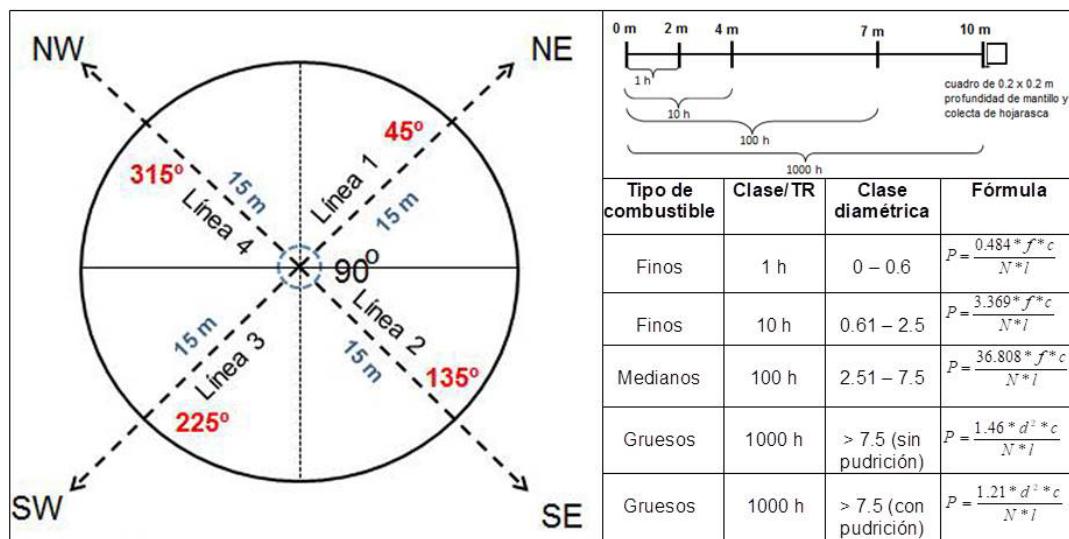


Figura 3. Diseño de las líneas de intersección planar para la medición del material leñoso caído, mantillo y hojarasca.

Tomado de Brown (1974); adaptado de Barrios-Calderón (2018). En las fórmulas, P = peso del combustible; f = frecuencia de intersecciones; c = factor de corrección de pendiente (en terrenos planos corresponde a 1); N = número de líneas; l = longitud de la línea; d^2 = diámetro elevado al cuadrado.

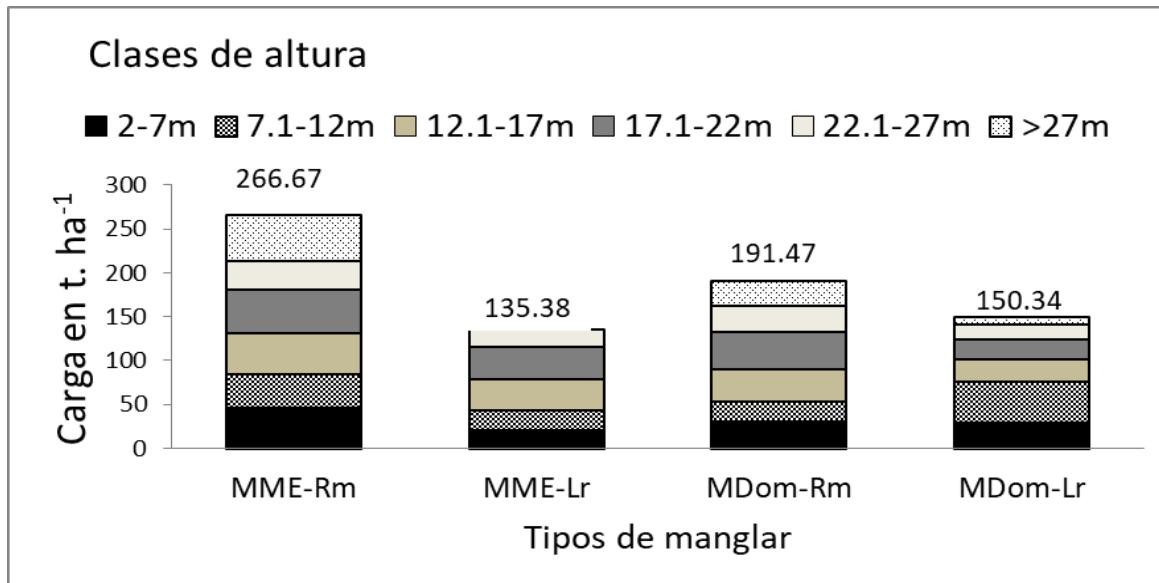


Figura 4. Total de la carga de combustibles por clases de altura del arbolado en estratos.

MME-Rm = manglar mono específico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr = manglar mono específico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm = manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr = manglar dominante de *Laguncularia racemosa*. El valor de la barra corresponde a la proporción de combustible que aporta cada clase diamétrica con respecto al total señalado en la CCF. Diferentes colores y texturas dentro de las barras indican la contribución absoluta de cada clase de altura.

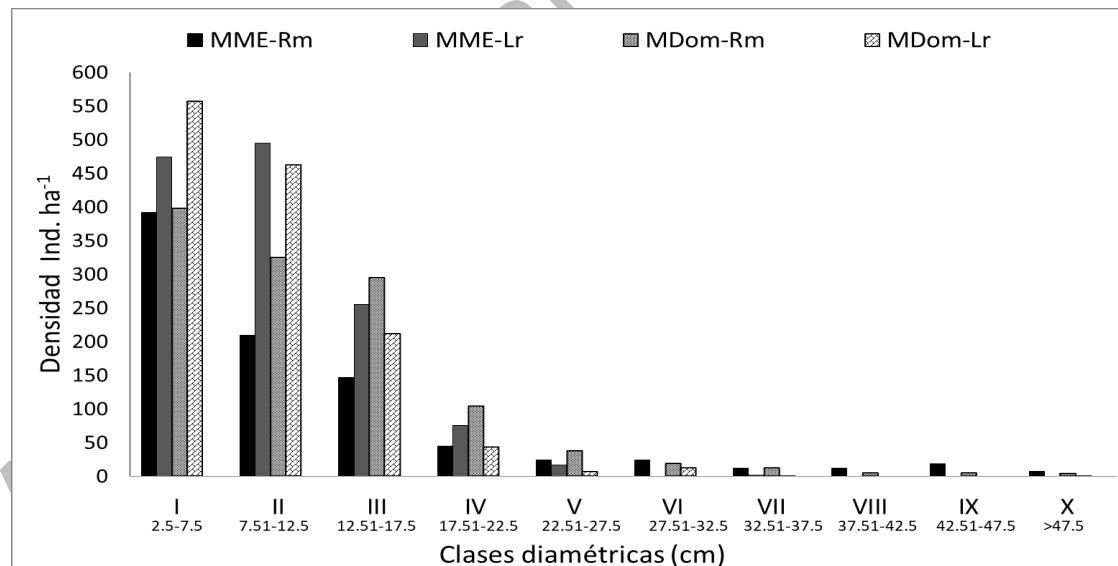


Figura 5. Número de individuos ha^{-1} para cada clase diamétrica ($\text{DAP} > 2.5 \text{ cm}$) en los diferentes tipos de manglar.

MME-Rm= manglar mono específico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr= manglar mono específico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm= manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr= manglar dominante de *Laguncularia racemosa*.

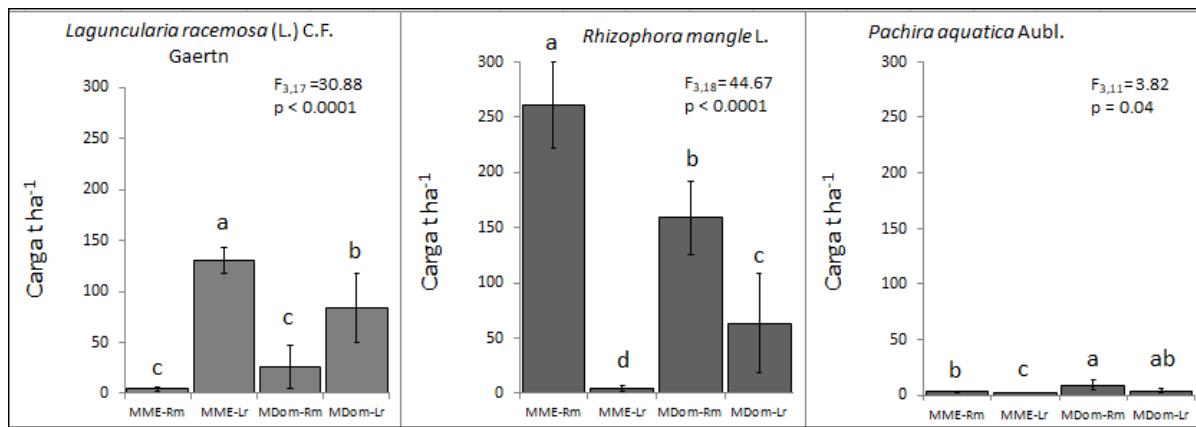


Figura 6. Análisis de varianza de la carga de combustibles (dosel y subdosed) para las especies presentes en las CCF de los cuatro tipos de manglar.

MME-Rm = manglar monoespecífico de *Rhizophora mangle*; MME-Lr = manglar monoespecífico de *Laguncularia racemosa*; MDom-Rm = manglar dominante de *Rhizophora mangle*; MDom-Lr = manglar dominante de *Laguncularia racemosa*. Las barras indican el valor promedio, la línea vertical una desviación estándar. Letras diferentes sobre las barras señalan diferencias significativas ($p < 0.05$).

Manuscrito recibido el 8 de abril de 2019

Aceptado el 10 de agosto de 2019

Publicado el 11 de abril de 2020

Este documento se debe citar como:

Barrios-Calderón, R. J., Infante Mata, D., Flores-Garnica, J. G., De Jong, B. H. J., Monzón Alvarado, C., & Maza-Villalobos Méndez, S. (2020). Análisis comparativo de camas de combustibles forestales en un ecosistema de manglar. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611950. doi: 10.21829/myb.2020.2611950