

INFLAMABILIDAD DE COMBUSTIBLES FORESTALES EN LAS SELVAS DE CALAKMUL, CAMPECHE

Flammability of forest fuels in the tropical forest of Calakmul, Campeche

AC Neri-Pérez, DA Rodríguez-Trejo ✉, R Contreras-Aguado

(ACNP)(DART)(RCA) División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Edo. de Méx., C.P. 56230, México. dantearturo@yahoo.com

Artículo recibido: 4 de junio de 2009, **aceptado:** 10 de agosto de 2009

RESUMEN. Este trabajo se realizó en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche, con la finalidad de determinar la inflamabilidad de cinco tipos de selvas (una de ellas en dos condiciones): selva alta subperennifolia, selva alta subperennifolia afectada por incendios, selva mediana subperennifolia, selva mediana subcaducifolia, selva baja subcaducifolia y selva baja inundable. Además se comparó la inflamabilidad entre tres estratos de combustibles forestales: herbáceos, hojarasca y subterráneos (capa de fermentación). Se estudiaron los cuatro componentes de la inflamabilidad: El tiempo a la ignición se evaluó registrando el tiempo a la ignición independiente. La duración de la combustión se determinó con el intervalo de tiempo desde la ignición al término de la combustión. El calor liberado fue estimado como el calor de combustión con un calorímetro. La proporción de combustible quemado se valoró como el porcentaje de combustible que se quemó. Cada parámetro de inflamabilidad fue comparado entre tipos de vegetación y estratos mediante un diseño experimental completamente al azar y utilizando análisis de varianza en los resultados. Se encontraron un tiempo más rápido a la ignición y menores calor liberado, proporción de combustible quemado y duración de la combustión en la selva mediana subcaducifolia, en comparación con la selva alta subperennifolia no importando su condición. Al comparar estratos, el tiempo a la ignición fue más lento en combustibles de la capa de fermentación que en hojarasca y herbáceas. El calor liberado, proporción de combustible quemado y la duración de la combustión, fueron mayores en la capa de fermentación que en la hojarasca y en esta última mayores que en las herbáceas.

Palabras clave: Tiempo a la ignición, calor liberado, duración de la combustión, proporción de combustible quemado.

ABSTRACT. This study was carried out in the Calakmul Biosphere Reserve, Campeche, in order to determine the flammability of five types of tropical forests, one of them in two conditions: subperennifolious tropical high forest (tropical rain forest), subperennifolious tropical high forest affected by fires, subperennifolious tropical medium forest (subperennifolious tropical moist forest), subcaducifolious tropical medium forest (subcaducifolious tropical moist forest), subcaducifolious tropical low forest (tropical dry forest) and tropical low flooded forest (flooded tropical dry forest). Also compared was the flammability among three layers of forest fuels: herbaceous, leaf litter and fermentation layer. Four flammability components were studied. The time to ignition (ignitibility) was evaluated recording the time to independent ignition. The duration of combustion (sustainability) was determined from the time of ignition to the end of combustion. The liberated heat (combustibility) was estimated as the combustion heat, and recorded with a calorimeter. The proportion of the burnt fuel (consumibility) was evaluated as the percentage of burnt fuel. Each parameter of flammability was compared among vegetation types and fuel layers with a completely randomised experimental design and an analysis of variance. The medium subcaducifolious tropical forest presented a faster ignitibility and a lower combustibility, consumibility and sustainability, in comparison with the subperennifolious tropical high forest. Comparing layers, the ignitibility was slower in the fuels in the fermentation layer than in the herbaceous and leaf-litter layers. The combustibility, consumibility and sustainability were greater in the fermentation layer than in the leaf-litter layer, as well as in this last layer compared with the herbaceous layer.

Key words: Ignitibility, combustibility, sustainability, consumibility.

INTRODUCCIÓN

Aunque los incendios en selvas eran poco comunes por la elevada humedad de estos ecosistemas, ahora son muy frecuentes a escala mundial, al punto que aproximadamente 50 % de la superficie afectada por el fuego corresponde a áreas tropicales y México no es la excepción (Goldammer 1999; Cochrane 2009). Este fenómeno ha sido exacerbado por las oscilaciones climáticas de El Niño (Barlow & Peres 2004) y la Niña y la cada vez mayor perturbación humana (Cochrane 2003). Sin embargo y a diferencia de ecosistemas forestales templado-fríos, casi no se han generado para los ecosistemas forestales tropicales ni modelos de combustibles, ni de comportamiento del fuego y se ha estudiado muy poco la inflamabilidad de sus combustibles.

Los incendios en selvas muchas veces son subterráneos y pueden alcanzar proporciones tales que sólo la lluvia los puede detener. Un ejemplo de lo anterior se vivió en selvas de reservas de la biosfera como Los Chimalapas y El Ocote, entre otras, durante la histórica temporada 1998 en México (CONANP 2005). Es importante contar con modelos sobre comportamiento del fuego, por ejemplo subterráneo, en combustibles de bosques tropicales y también comprender mejor la inflamabilidad de los mismos, tanto para apoyar las labores de combate de incendios forestales, como para generar índices de peligro y ayudar a entender mejor los impactos ambientales del fuego.

Comparado con el comportamiento del fuego en zonas templado frías, en las selvas las llamas son más pequeñas y se propagan más lentamente. Alvarado (2006) señala que en experimentos en el Amazonas la velocidad de propagación del fuego va de 0.16 a 0.26 m min⁻¹, con máximos de 0.35 m min⁻¹, así como largos de llama de 30 cm y profundidades de llama del orden de 10 cm. A tal comportamiento del fuego corresponden contenidos de humedad menores a 13.5 % y no se observa propagación si la humedad de los combustibles es mayor a 15 %. Sin embargo, a pesar de tal comportamiento, los incendios originan importante mortalidad en los árboles tropicales porque éstos no presentan adaptaciones al fuego.

El fenómeno físico-químico de la combustión es básicamente el mismo para todo tipo de combustible forestal, es decir, la descomposición de materiales orgánicos en bióxido de carbono, vapor de agua, diversos gases, con liberación de luz y calor, además de minerales. Sin embargo, las distintas propiedades de los combustibles forestales, como su tamaño, forma, continuidad, carga, contenido de sustancias inflamables, entre otras, determinan junto con los complejos topográfico y de tiempo atmosférico, el comportamiento del fuego.

Este último es su dirección, velocidad de avance e intensidad, entre otras características (Pyne *et al.* 1996). Las propiedades ya referidas de los combustibles forestales también influyen en la facilidad con que arderán al entrar en contacto con una fuente de calor, es decir, en su inflamabilidad. En el caso de muchos bosques tropicales, son los combustibles finos los que gobiernan el comportamiento del fuego (Cochrane 2003), por lo que es relevante su estudio.

La inflamabilidad también influye el comportamiento del fuego, así como en la severidad del mismo. Por ejemplo, tanto la hojarasca como la capa de fermentación y la de humus se secan más rápido en bosques de coníferas que en los de latifoliadas, en particular la zona superior de la capa de fermentación (van Wagner 1987). Dada la abundancia y concentración de raíces en esta capa, tanto en vegetación templado fría como en la tropical, su afectación por el fuego deriva en una alta mortalidad en las plantas, tanto arbóreas como del sotobosque (Miyaniishi 2001).

La inflamabilidad se puede definir como la capacidad de un combustible para entrar en ignición y sostener el fuego, y está dada por tres fenómenos: tiempo a la ignición (ignitibility), duración de la combustión (sustainability) y calor liberado (combustibility) (Anderson 1970), agregándose también la proporción de combustible quemado (consumibility), referida por Martin *et al.* (1994). A continuación se definen estos términos, de acuerdo con los autores señalados.

El tiempo a la ignición es la facilidad con la que un material entra en ignición. La duración de la combustión describe la propiedad de un combusti-

ble para continuar quemándose. El calor liberado se refiere al calor desprendido, que ha de ser en cantidad suficiente para mantener la combustión y propagarla a la materia vegetal próxima. Finalmente, la proporción de combustible quemado se refiere a la proporción de la masa de un combustible que entró en combustión.

Con base en lo anterior, los objetivos del presente trabajo son: Determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales de cinco tipos de selvas y dos condiciones de uno de ellos en la Reserva de la Biosfera de Calakmul y comparar la inflamabilidad en los tres estratos de combustibles: herbáceo, hojarasca y capa de fermentación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC) se localiza al sureste del estado de Campeche, México, en el municipio de Calakmul. Cuenta con una superficie de 723 185 ha. En dicha extensión se hallan distintos subtipos de climas cálidos subhúmedos (Aw). Los suelos corresponden a la asociación Xpujil, con texturas finas y derivan de rocas calizas. Las unidades de suelo incluyen, entre otras, rendzinas, gleysoles y vertisoles (INE-SEMARNAP 1999). Acorde con esta última fuente, los tipos de vegetación presentes se establecen en aguadas, áreas pantanosas con especies adaptadas a condiciones de inundación (principalmente con tintal, *Haematoxylum campechianum*); agrupaciones de herbáceas hidrófilas (como *Pistia stratioides* y *Nynphaea ampla*, entre otras); selvas altas perennifolia y subperennifolia, con árboles de más de 30 m de altura, con frecuencia sobre rendzinas (que se estima albergan más de 400 especies vasculares, entre ellas los árboles *Manilkara zapota*, *Bursera simaruba*, *Brosimum alicastrum*, *Ceiba pentandra*, *Tabebuia guayacan*, *T. rosea*, *Lonchocarpus castilloi*); selvas medianas subperennifolia y subcaducifolia, vegetación dominante de la Reserva, con árboles no mayores a 25 m de altura sobre suelos rocosos y con 25-50 % de sus elementos que pierden la hoja durante la época de sequía (destacando *Swietenia macrophylla*, *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba*, *Cedrela mexicana*, *Vi-*

tex gaumeri, *Protium copal*, *Sabal yapa* y *Chlorophora tinctoria*, entre otros); selva baja subperennifolia inundable, sobre áreas con drenaje deficiente, los árboles no sobrepasan 10 m de altura (*Bucida buceras*, *Haematoxylum campechianum*, *Metopium brownei*, entre otras); selva baja subperennifolia, de composición semejante a la selva mediana subperennifolia, pero en la que el efecto del suelo pobre y probablemente también del viento, no permiten un gran crecimiento de los árboles, que no rebasan 15 m de altura (*Brosimum alicastrum*, *Manilkara zapota*, *Vitex gaumeri*, *Dendropanax arboreus*, *Sabal yapa*, *Piscidia piscipula*); selva baja caducifolia (*Guayacum sanctus*, *Esenbeckia yax-hob*, *Lysiloma latisiliqua*, *Pseudobombax ellipticum* y *Ceiba schottii*), además de vegetación secundaria.

Diseño de muestreo

En la RBC, en enero de 2006, se muestrearon cinco tipos de selva poco perturbada, una de ellas con dos condiciones: selva alta subperennifolia (SAsp), selva alta subperennifolia afectada por incendios hacia 2003 (SAspQ) (ésta sí perturbada), selva mediana subperennifolia (SMsp), selva mediana subcaducifolia (SMsc), selva baja subcaducifolia (SBsc) y selva baja inundable (SBI) (Figuras 1 a 3).

En cada tipo de selva y condición, en febrero de 2006 se obtuvieron tres muestras al azar de 30 x 30 cm, colectándose las diferentes capas de combustibles superficiales y subterráneos: herbáceas, hojarasca y capa de fermentación (Figura 4). De estas muestras de hojarasca se retiraron los materiales leñosos (evaluados en otro trabajo, con base en la metodología de Brown *et al.* 1982) y de la capa de fermentación se limpió el suelo mineral, manualmente en ambos casos. Posteriormente se uniformizaron las muestras mediante molienda.

Métodos de laboratorio

Las muestras fueron deshidratadas en un horno de secado y en laboratorio se llevaron a cabo las pruebas de tiempo a la ignición y duración de la combustión. Se usaron diez repeticiones, tomadas al azar de las tres muestras, por tipo de ecosistema y estrato de combustibles forestales. En cada repe-



Figura 1. Panorámica de combustibles superficiales en selva alta subperennifolia.
Figure 1. Overview of surface fuels in the subperennifolious tropical high forest.



Figura 3. Combustibles forestales superficiales en selva baja inundable.
Figure 3. Surface forest fuels in the tropical low flooded forest.



Figura 2. Combustibles superficiales en selva mediana subcaducifolia. Nótese las rocas calizas, relacionadas con la geología cárstica de la región.
Figure 2. Surface fuels in the subcaducifolious tropical medium forest. Note the calcareous rocks typical of the karstic geology of the region.



Figura 4. Corte vertical entre combustibles superficiales y subterráneos en selva alta subperennifolia.
Figure 4. Vertical cut of surface fuels and fermentation layer in the subperennifolious tropical high forest.

tición se pesó y colocó 1 g de muestra en un vaso de precipitado. Posteriormente se utilizó una cámara de extracción de gases, en la cual se colocó en un soporte universal una malla de asbesto y bajo ella un mechero de Bunsen abierto al máximo. Se puso el vaso de precipitado sobre la malla y se tomó el tiempo hasta la ignición con ayuda de un cronómetro y denotada por el momento en que se inició la

emisión de humo.

Por otra parte, se pesó 1 g de cada tipo de combustible forestal y distribuyó uniformemente sobre una barra de acero de 20 cm², a su vez colocada con una pendiente de 100 % sobre dos soportes. En la parte baja se colocó un ventilador de bolsillo (velocidad de la corriente de aire igual a 7 km h⁻¹ medida, con anemómetro portátil). Se encendió el

combustible con ayuda de un mechero de Bunsen y se registró el tiempo de consumo (desde el inicio hasta el fin de la combustión) para obtener la duración de la combustión. La cantidad de material utilizado en el experimento no corresponde a una carga real, pero se proporcionaron las condiciones semejantes a los combustibles de los diferentes tipos de selva y de los tres estratos.

También en el laboratorio se realizaron las pruebas de calor liberado y proporción de combustible quemado. Para realizar las pruebas de calor liberado y proporción de combustible quemado se formaron 11 tabletas por muestra, con ayuda de una peletizadora Parr. Se pesó una tableta por cada muestra para obtener el peso húmedo, colocando las tabletas en la estufa a 85 °C durante 72 h y pesando las muestras se obtuvo el peso seco. El contenido de humedad (CH) se determinó con base en el peso húmedo (ph) y el seco (ps), con la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{(ph - ps)}{ps} (100)$$

Las tabletas fueron pesadas y colocadas en la cápsula de una bomba de oxígeno calorimétrica 1 341 Parr. Se realizaron las pruebas de calor liberado en este calorímetro, registrando la temperatura inicial y final del termómetro. Se lavaron las superficies interiores de la bomba con un chorro de agua destilada y el agua de lavado fue colectada en un vaso de precipitado. Ésta se depositó en un matraz Erlenmeyer de 50 ml y se aforó. Los pedazos de alambre de los electrodos de la bomba fueron removidos, se enderezaron y se midió su longitud en centímetros.

Posteriormente se filtró el agua de lavado con un papel filtro y se depositó en un vaso de precipitado. Se pusieron a secar el papel filtro con las cenizas producto de la quema en la estufa a 85 °C durante 72 h. Se pesaron las cenizas y se obtuvo el porcentaje de ceniza (%c) y la proporción de combustible quemado (Co), acorde con los siguientes modelos:

$$\%c = \frac{pf}{pi} (100)$$

$$Co = 100 - \%c$$

Donde:

pf=peso de las cenizas

pi=peso inicial de la muestra.

Se tomaron 10 ml del agua de lavado y se colocaron en un matraz de 50 ml, con el propósito de analizar el agua de lavado de la bomba para determinar el contenido de azufre, utilizando el "Spectronic 20 Bausch Lomb". Se disolvieron 3.76 g de Na₂CO₃ en agua diluyendo a 1 L para obtener una solución estándar de carbonato de sodio (0.0709 N). Se agregaron 10 ml de la solución estándar a los 40 ml restantes del agua de lavado para titular, utilizando como indicador el anaranjado de metilo.

Se realizaron los cálculos y se determinó el calor de combustión de las muestras con la siguiente ecuación:

$$Hg = \frac{(Tw - e1 - e2 - e3)}{m}$$

Donde:

Hg = Calor de combustión (cal g⁻¹)

T = aumento de temperatura (°C) = tf - t0

t0 = temperatura al tiempo de encendido, corregida para la escala en el termómetro (se suma 0.004)

tf = temperatura final, corregida al error de escala en el termómetro (se suma 0.008)

w = equivalente energético del calorímetro, bajo estandarización (cal/ °C)

m = masa de la muestra (g)

e1 = Corrección (cal) para el calor de formación de ácido nítrico (HNO₃) = c1

e2 = Corrección (cal) para el calor de formación de ácido sulfúrico (H₂SO₄)

e2 = (13.7) (c2)(m)

e3 = corrección para el calor de combustión del alambre fusible (cal)

e3 = (2.3) (c3)

c1 = solución alcalina estándar utilizada en la titulación ácida (ml)

c2 = azufre en la muestra (%)

c3 = cm de alambre fusible consumidos en el encendido.

Análisis de datos

Las muestras se obtuvieron al azar en los distintos tipos y condiciones de vegetación. Para las

pruebas de laboratorio se utilizó un diseño experimental completamente al azar para tipos y condiciones de vegetación y otro del mismo tipo para los estratos de combustibles forestales. Los datos de tiempo a la ignición, duración de la combustión, calor liberado y proporción de combustible quemado fueron sometidos a un análisis de varianza, y se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey ($p = 0.05$), empleando para ello el programa SAS para microcomputadoras (v. 8.0). Las comparaciones se hicieron una entre los distintos tipos y condiciones de vegetación y otra entre los tres estratos de combustibles forestales. Las comparaciones entre los tipos y condiciones de vegetación se hicieron con 30 muestras, es decir, 10 por tipo o condición de vegetación para cada uno de los tres estratos, teniendo un total de 180 muestras (10 x 6 tipos o condiciones de vegetación x 3 estratos). Las comparaciones de los estratos de combustibles se hicieron con 60 muestras por estrato (incluyendo muestras de los diferentes tipos y condiciones de vegetación), para un total de 180.

RESULTADOS

Comparación entre tipos de vegetación

Excepto por la duración de la combustión, todos los indicadores de inflamabilidad resultaron con diferencias estadísticamente significativas, entre por lo menos un par de tipos de vegetación o condiciones (Tabla 1). No hubo diferencias significativas en la humedad de las muestras, lo que denota condiciones de humedad semejantes en las mismas a la hora de llevar a cabo las pruebas de laboratorio.

Analizando cada componente de la inflamabilidad individualmente, la comparación de medias arrojó diferencias sólo entre la selva alta subperennifolia, con mayor tiempo de ignición que la selva mediana subcaducifolia (Figura 5). A su vez, el calor liberado fue mayor en la selva alta subperennifolia y en la selva baja subcaducifolia que en la selva mediana subcaducifolia (Figura 6). La proporción de combustible quemado fue mayor en la selva alta subperennifolia y en la selva baja subcaducifolia que en las selvas medianas subperennifolia y subcaducifolia (Figura 7). En el caso de la duración de

la combustión, no se hallaron diferencias entre tipos de vegetación (Figura 8).

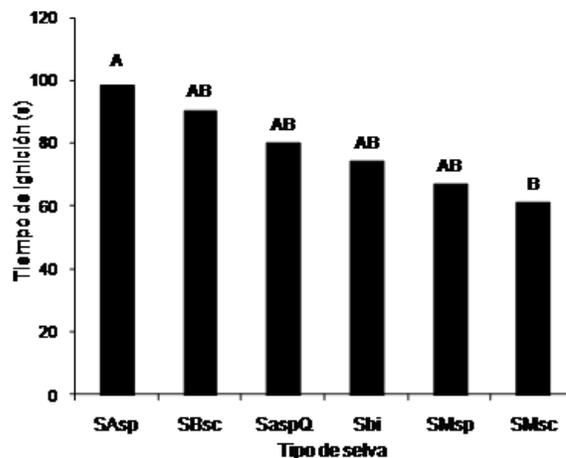


Figura 5. Tiempo a la ignición para combustibles por tipo de selva. Las barras con la misma letra indican que no hubo diferencias significativas entre sus tratamientos. Barras con diferente letra sí las tuvieron.

Figure 5. Ignitibility of fuels per type of tropical forest. Bars with the same letter indicate no significant differences among treatments. Bars with a different letter indicate significant differences among treatments.

Comparación entre estratos

El ANOVA arrojó diferencias significativas en tiempo a la ignición, calor liberado, proporción de combustible quemado y duración de la combustión. No así en el contenido de humedad de las muestras (Tabla 2), lo que denota condiciones de humedad equivalentes para los análisis de laboratorio entre los combustibles de los tres estratos estudiados.

De acuerdo con la comparación de medias, los combustibles subterráneos (capa de fermentación) mostraron el mayor tiempo a la ignición, es decir, les tomó más tiempo arder, seguidos por la hojarasca y, a su vez, por las herbáceas, con diferencias significativas entre las tres (Figura 9).

En relación al calor liberado, los combustibles subterráneos fueron los que liberaron más energía, seguidos por la hojarasca y las herbáceas, todos con diferencias estadísticamente significativas entre sí (Figura 10).

También los tres estratos exhibieron diferencias entre sí en proporción de combustible quemado,

Tabla 1. Análisis de varianza de la inflamabilidad por tipos de vegetación de la RBC. GL. son los grados de libertad.

Table 1. Variance analysis of fuel flammability per type of vegetation, in the Calakmul Biosphere Reserve. GL are degrees of freedom.

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	p
Ignitabilidad	5	29971.56	5994.31	0.02
Combustibilidad	5	7900976.16	1580195.23	0
Consumibilidad	5	2646.72	529.34	0
Sostenibilidad	5	41293.64	8258.73	0.83
% Humedad	5	0.44	0.09	0.99

Tabla 2. Análisis de varianza de la inflamabilidad entre los estratos de combustibles.

Table 2. Variance analysis of flammability among layers of forest fuels.

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	p
Ignitabilidad	2	359280.54	179640.27	<.0001
Combustibilidad	2	55157119.21	27578559.61	<.0001
Consumibilidad	2	11752.30	5876.15	<.0001
Sostenibilidad	2	3333981.68	1666990.84	<.0001
% Humedad	2	3.38	1.69	0.08

con los mayores valores para los combustibles subterráneos, seguidos por la hojarasca y por los combustibles herbáceos (Figura 11). La duración de la combustión fue diferente para los tres estratos.

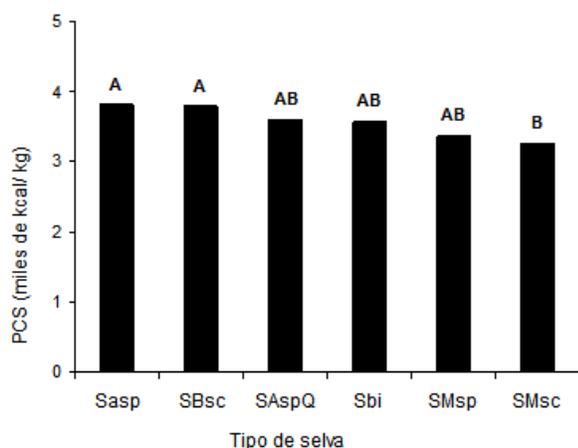


Figura 6. Calor liberado (PCS) por combustible por tipo de selva.
Figure 6. Combustibility (PCS) per fuel per type of tropical forest.

DISCUSIÓN

Comparación entre tipos de vegetación

Se hallaron pocas diferencias en los paráme-

tros de inflamabilidad evaluados entre tipos de vegetación, lo cual puede deberse a que todos los estudiados son ecosistemas igualmente sensibles al fuego (Rodríguez 2008), pues Mutch (1970) estableció su hipótesis en la cual las especies de vegetación dependiente del fuego son más inflamables que las especies de vegetación no dependiente del fuego, ya que la selección natural ha favorecido el desarrollo de características que hacen a las primeras más inflamables. La diferencia que sí se registró fue un menor tiempo de ignición, así como menor calor liberado y menor proporción de combustible quemado de los combustibles de selva mediana subcaducifolia, con respecto a los de la selva alta subperennifolia. Esto puede relacionarse con el tipo de follaje, caducifolio o perennifolio de las especies en ambos tipos de vegetación. Por ejemplo, en zonas templado-frías y semiáridas, con frecuencia los encinos arbóreos caducifolios tienden a exhibir un régimen de fuegos más frecuentes y a ser más resistentes o resilientes al fuego que los encinos arbóreos perennifolios (Rodríguez & Myers aceptado). Se esperaría mayor calor liberado y mayor proporción de combustible quemado en la selva subcaducifolia, en comparación con la subperennifolia, como sucedió con la más rápida ignición en la primera, con respecto a la segunda.

Tales diferencias pueden deberse a la mayor diversidad de especies arbóreas en los ecosistemas tropicales, así como a que ambos tipos de selva pueden tener cerca del 50 % de especies que pierden sus hojas en la zona de estudio, haciendo más difícil hallar tendencias claras.

En otros trabajos, se han detectado diferencias en inflamabilidad de combustibles entre especies de vegetación dependiente del fuego con respecto a especies de vegetación sensible al mismo. Por ejemplo, Mutch (1970) comparó hojas de *Pinus ponderosa* (dependiente del fuego) y de latifoliadas tropicales (no dependientes del fuego), encontrando para las primeras mayores contenidos de grasas crudas, contenido de calor, poder calorífico y liberación de energía durante la combustión, así como menores residuos de la combustión. A su vez, Fonda (2001) halló que las acículas de especies de pino resistentes al fuego, que sobreviven incendios superficiales (como *Pinus palustris* y *P. ponderosa*,) generan una llama más larga, su biomasa se consume más y su tasa de pérdida de masa es mayor que en los pinos evasores, los cuales son muertos por fuegos de copa pero se regeneran en las localidades incendiadas (como *P. contorta* y *P. banksiana*), en tanto que en estos últimos hubo mayores tiempos de llama y de quema.

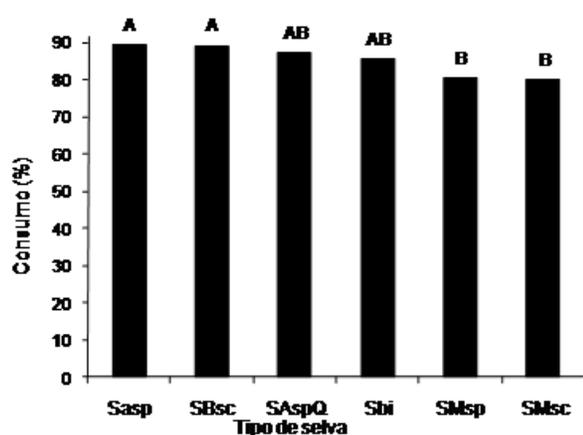


Figura 7. Proporción de combustible quemado por tipo de selva.
Figure 7. Consumibility per type of tropical forest

De manera semejante, Kane et al. (2008) estudiaron el calor liberado por la hojarasca de ocho

encinos que cohabitan con *P. palustris*, especie típicamente pirófila, en el sureste de los Estados Unidos. Encontraron que *Q. laevis* (brevideciduo) y *Q. stellata* (deciduo) generan altas intensidad, duración de la combustión y proporción de combustible consumido, que incluso son equivalentes a las de *P. palustris*, resistente al fuego. A su vez, *Q. hemisphaerica* y *Q. virginiana* (ambos siempreverdes), tuvieron menores intensidad, duración de la combustión y proporción de combustible quemado, pues tienden a “evitar” el fuego. Por su parte, Behm et al. (2004) estudiaron la inflamabilidad de especies del sotobosque de pinares (dependientes del fuego) y bosques latifoliados (menos adaptados a los incendios) en Florida, hallando mayor tiempo a la ignición, duración de la combustión y calor liberado en las primeras que en las segundas, si bien la proporción de combustible quemado fue semejante en ambas condiciones.

En el caso de las selvas, aunque en general son sensibles al fuego, aquellas subcaducifolias podrían tener condiciones un poco más secas en el suelo durante la época de sequía que las selvas perennifolias, pues el paso de la radiación solar es mayor en las primeras. Sin embargo, se requiere de más estudios.

La selva mediana subperennifolia y la selva mediana subcaducifolia tienen una carga de combustibles mediana, de 43.15 y 26.71 ton ha⁻¹ (Contreras et al. 2006), pero este tipo de vegetación constituye el 50 % de la extensión de la reserva (INESEMARNAP 1999). La inflamabilidad relativamente baja en la selva mediana, concuerda con lo observado cualitativamente en la Sierra de Manantlán, considerando que se encuentra distribuida en los sitios más húmedos; su hojarasca no arde bien, por lo que el fuego es de baja intensidad, se propaga lentamente y se extingue con facilidad, aunque causa mortalidad en los árboles (Jardel et al. 2007). Sin embargo, es el tipo de vegetación más alterado por actividades humanas, principalmente con fines agrícolas, ganadería, colonización, caza y explotación forestal. Cuando se produce una extracción selectiva de árboles, el bosque primario se vuelve susceptible a incendios, ya que aumenta el combustible y el tamaño de los parches que reciben insolación directa (Holdsdworth & Uhl 1997). A pesar que la selva alta no es el tipo de vegetación más inflamable de

entre los estudiados, el cambio de uso del suelo y el fuego llevarían a una condición de pastizales con especies exóticas que sería sostenido por un régimen de fuegos muy frecuentes.

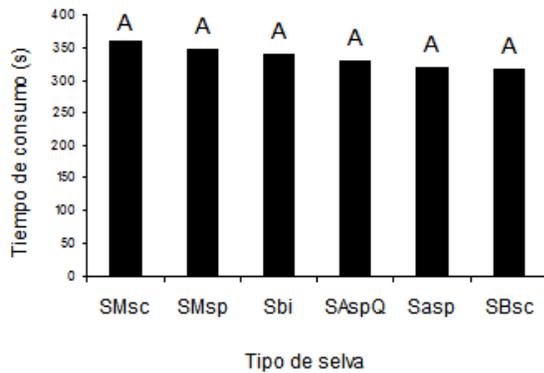


Figura 8. Duración de la combustión para combustibles por tipo de selva.

Figure 8. Sustainability per type of tropical forest.

Comparación entre estratos

En relación a los estratos de combustibles forestales analizados, existe un gradiente de descomposición de tales materiales de nula a avanzada, al ir de herbáceas, hojarasca a combustibles subterráneos (capa de fermentación). Cuando los materiales orgánicos son degradados por los microorganismos, primero se afectan productos como la celulosa, después la lignina, más resistente (Waring & Running 1998) y la combustión de la celulosa genera gases que al entrar en ignición producen llamas, mientras que la combustión de la lignina casi no produce llamas (De Bano *et al.* 1998). Se halló un gradiente de menor a mayor tiempo de ignición de herbáceas a capa de fermentación, debido a la mayor proporción de ligninas presentes en los combustibles conforme estaban más descompuestos. Acorde con Artsybashev (1986), la combustión de celulosas precede a la de ligninas durante la combustión de materiales leñosos, lo que ayuda a explicar la más pronta ignición en herbáceas.

El calor liberado al consumirse el combustible, también exhibió un patrón de mayor a menor, al pasar de capa de fermentación a herbáceas, al igual que la proporción de combustible quemado y la duración de la combustión. Aunque tardan más

en arder que las herbáceas, la hojarasca y la capa de fermentación tienden a sostener más su combustión y liberan más energía durante el proceso.

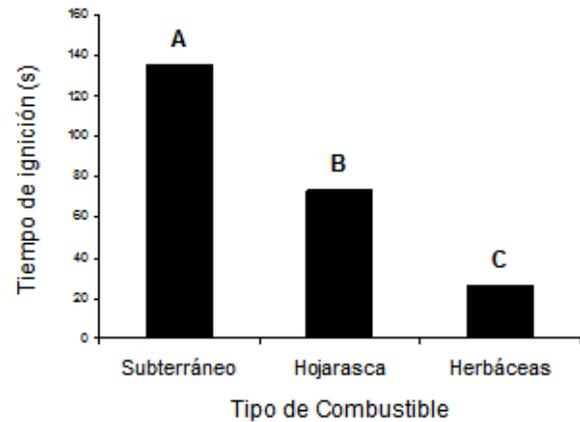


Figura 9. Tiempo a la ignición por tipo de combustible.
Figure 9. Ignitibility per type of fuel.

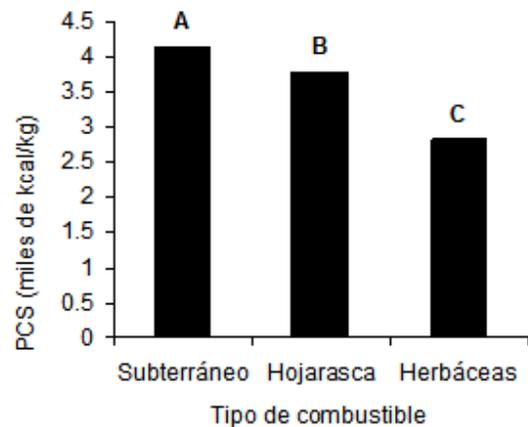


Figura 10. Calor liberado (PCS) por tipo de combustible.
Figure 10. Combustibility (PCS) per type of fuel.

Las tendencias observadas en los combustibles subterráneos, dejan ver el peligro de incendio subterráneo en selvas durante temporadas de sequía extremas, como las asociadas a fenómenos del Niño y la Niña, en particular en selvas perturbadas, donde el dosel abierto permite la incidencia de radiación solar directa, que contribuye a la menor humedad en el suelo y al secado de combustibles forestales, así

como a la entrada de helechos invasores altamente inflamables. Acorde con Cochrane (2003), una selva no alterada es más difícil que se incendie, pues el dosel arbóreo contribuye a mantener la humedad de los combustibles forestales bajo él.

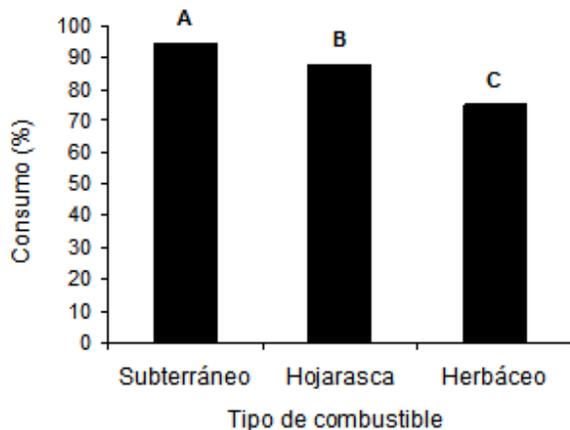


Figura 11. Porcentaje de combustible quemado por tipo de combustible.

Figure 11. Percentage of burnt fuel per type of fuel.

Se debe señalar que en condiciones naturales, el contenido de humedad de la hojarasca se establece en gran medida por condiciones de equilibrio con la humedad del aire, en tanto que en la capa de fermentación influye la humedad del suelo, a su vez determinada por la precipitación, en tanto que en combustibles vivos su contenido de humedad depende de la fisiología de las plantas (Pyne *et al.* 1996; Cochrane & Ryan 2009).

Es importante tomar en cuenta que en la Reserva de la Biosfera de la Selva el Ocote, un factor que influye en la presencia de los incendios subterráneos, es la geología cárstica de la región, que facilita la presencia de acumulaciones subterráneas de combustibles, incluso en pasadizos naturales que por debajo de la superficie del suelo se puede mantener la combustión o comunicación del fuego hacia otros sitios (com. pers. Ing. José Velázquez, 2000). En la RBC la geología es muy semejante a la de la Reserva Selva el Ocote y los suelos también son de origen cárstico, por lo cual se tiene el mismo peli-

gro de presentar incendios subterráneos en épocas extremadamente secas.

Debido al aumento de incendios forestales en bosques tropicales, muchos relacionados con los fenómenos de El Niño y la Niña, es importante estudiar los combustibles forestales y su inflamabilidad en estos ecosistemas.

Si bien en el peligro de incendio inciden variables del tiempo atmosférico y antrópicas, por cuanto toca a las características intrínsecas de los combustibles forestales en los tipos y condiciones de selva analizados, las selvas medianas subcaducifolias son las que pueden entrar en combustión con mayor rapidez que las selvas altas subperennifolias, si bien los otros tipos de selvas no mostraron diferencias con respecto a estos dos tipos mencionados.

Los resultados del presente trabajo indican que en las selvas los combustibles forestales superficiales entran en ignición con mayor facilidad que los combustibles subterráneos, cuando tienen contenidos de humedad semejantes. Eso indica que los combustibles subterráneos requieren de sequías más intensas para secarse lo suficiente y arder, pero lo hacen más intensa y sostenidamente que los combustibles superficiales. Tales sequías cada vez son más frecuentes, por lo que junto con el disturbio humano que en tales condiciones se presentan, los incendios forestales, como los subterráneos, tienden a ser más intensos, severos y difíciles de controlar.

Los resultados anteriores denotan la mayor inflamabilidad de la capa de fermentación como uno de los factores subyacentes en los incendios subterráneos bajo condiciones muy secas en ecosistemas tropicales forestales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado en el desarrollo de la investigación. Al Biól. José Cutberto Vázquez Rodríguez por facilitar el uso del laboratorio de Fitotecnia. Al personal de dicho laboratorio y al Sr. Gerardo Mendoza Ángeles por su colaboración en los análisis de laboratorio.

LITERATURA CITADA

- Alvarado-Celestino E (2006) Consideraciones sobre incendios en bosques tropicales y templados de áreas protegidas de México y Brasil. En: Flores-Garnica J G, Rodríguez-Trejo D A, Estrada-Murrieta O, Sánchez-Zárraga F (coords). Incendios forestales. CONAFOR-Mundi Prensa. México, D. F. pp. 171-184.
- Anderson HE (1970) Forest fuel ignitibility. *Fire technology* 6: 312-319.
- Artsybashev ES (1986) Forest fires and their control. Russian Translations Series 15. Lesnaya Promyshlennost Publishers. A. A. Balkema. Rotterdam. 160 pp.
- Barlow J, Peres CA (2004) Ecological responses to El Niño-induced surface fires in Central Brazilian Amazonia: management implications for flammable tropical forests. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* 359(1443): 367-380.
- Behm AL, Duryea ML, Long AJ, Zipperer WC (2004) Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems wildland-urban interface. *International Journal of Wildland Fire* 13: 355-365.
- Brown JK, Oberheu RD, Johnston CM (1982) Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. USDA Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-129. 52 pp.
- Cochrane MA (ed) (2009) Tropical fire ecology. Springer-Praxis. Germany. 645 pp.
- Cochrane MA (2003) Fire science for rain forests. *Nature* 421: 913-919.
- Cochrane MA, Ryan KC (2009) Fire and fire ecology: Concepts and principles. In: Cochrane MA (ed.) Tropical fire ecology. Springer-Praxis. Germany. pp. 25-62.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas - REBISO (Reserva de la Biosfera Selva El Ocote) (2005) Plan de Manejo Integral del Fuego. CONANP. Tuxtla Gutiérrez, Chis., Mexico. Inédito.
- Contreras-Aguado R, Nolasco-Morales A, Rodríguez-Trejo DA (2006) Plan de Manejo del Fuego para el complejo CBKKBK. 113 pp. (inédito).
- De Bano LF, Neary DG, Ffolliott, PF (1998) Fire's effects on ecosystems. John Wiley & Sons. New York. 333 pp.
- Fonda RW (2001) Burning characteristics of needles of eight pine species. *Forest Science* 47(3): 390-396.
- Goldammer JG (1999) Forests on fire. *Science* 284: 1782-1783.
- Holdsworth AR, Uhl C. (1997) Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. *Ecological Applications* 7: 713-725.
- INE (Instituto Nacional de Ecología) - SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) (1999) Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Calakmul. México. INE-SEMARNAP. México. 277 pp.
- Jardel-Pelaez E, Ramírez-Villeda R, Castillo-Navarro F, García-Ruvalcaba S, Balcázar O E, Chacón-Mathieu J C, Morfín-Ríos J (2007) Manejo del fuego y restauración de bosques en la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán, México. En: Flores-Garnica JG, Rodríguez-Trejo DA, Estrada-Murrieta O, Sánchez-Zárraga F (coords). Incendios forestales. CONAFOR-Mundi Prensa. México, D. F. pp. 215-242.
- Kane JM, Varner JM, Hiers JK (2008) The burning characteristics of southern oaks: discriminating fire facilitators from fire impiders. *Forest Ecology and Management* 256(12): 2039-2045.

- Martin RE, Gordon D A, Gutierrez M, Lee D, Schoeder RMA, Sapsis DB, Stephens S, Molina D (1994) Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. Proceedings. 12th International Fire and Forest Meteorology Conference pp. 130-137.
- Miyanishi K (2001) Duff consumption. In: Johnson EA, Miyanishi K (eds). Forest fires. New York. Academic Press. pp. 437-475.
- Mutch RW (1970) Wildland fires and ecosystems - a hypothesis. *Ecology* 51(6): 1046-1051.
- Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD (1996) Introduction to wildland fire. 2nd. ed. Wiley. New York. 769 pp.
- Rodríguez-Trejo DA (2008) Fire regimes, fire ecology and fire management in Mexico. *Ambio* 37 (7-8): 548-556.
- Rodríguez-Trejo DA, Myers RL (2008) Using characteristics of oaks as guides to restoring fire regimes in Mexican pine-oak and oak forests. *Ecological Restoration* (accepted).
- van Wagner (1987) Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 35. Canadian Forest Service. Ottawa, On., Canada. 37 pp.
- Waring RH, Running SW (1998) Forest ecosystems. 2nd ed. San Diego, Ca. Academic Press. 370 pp.