Consumo de combustible por quema de la capa de hojarasca de bosque de pino-oyamel y pino-encino

Ruben Ortiz-Mendoza[1]; Marco A. González-Tagle[1*], Diego R. Pérez-Salicrup[2]; Oscar A. Aguirre-Calderón[1]; Wibke Himmelsbach[1]; Luis G. Cuéllar-Rodríguez[1]

[1]*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional km 145. C.P. 67700. Linares, Nuevo León, México.*
[2]*Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Antigua carretera a Pátzcuaro 8701. C.P. 58190. Morelia, Michoacán, México*

Artículo recibido el 17 de mayo y aceptado el 12 de junio de 2024

Fuel consumption by burning of litter layer in pine-fir and pine-oak forests.

Abstract

Forest fires consume large amounts of forest fuel. The objective of this work was to evaluate the consumption of the litter layer in burning pine-oak and pine-fir forest fuelbeds present in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. Litter layers (n=54), were burned in three slope conditions (0, 10 and 20°). The pre-burn and post-burn load was evaluated for fuel consumption. We found no variation in litter layer burning between pine-oak and pine-fir, nor between slopes. The percentage of consumption was 60 and 45 % in pine-oak and pine-oak, respectively. Consumption was significantly correlated with fire behavior, fuel load and combustion efficiency factor allowing the generation of linear consumption estimation equations. The litter layers in which pine needles are integrated have no variation in fuel consumption, suggesting that the dominance of pine needles may be an indicator of the same fuelbed.

Key words: combustion, forest fuels, fire behavior, combustion efficiency factor, needles.

Resumen

Los incendios forestales consumen grandes cantidades de combustible forestal. El objetivo de este trabajo fue evaluar el consumo de la capa de hojarasca en quemas de camas de combustibles forestales de pino-encino y pino-oyamel presentes en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Se quemaron capas de hojarascas (n=54), en tres condiciones de pendiente (0, 10 y 20°). Se evaluó la carga pre y post quema para conocer el consumo de combustibles. No encontramos variación de consumo en las quemas de la capa de hojarasca entre pino-encino y pino-oyamel, tampoco entre pendientes. El porcentaje de consumo fue de 60 y 45% en pino-oyamel, pino-encino, respectivamente. El consumo se correlacionó significativamente con el comportamiento del fuego, la carga de combustible y el factor de eficiencia de combustión permitiendo generar ecuaciones lineales de estimación de consumo. Las capas de hojarascas en las que están integradas las acículas de los pinos no tienen variación en el consumo de combustible, sugiriendo que la dominancia de las acículas de pinos puede ser un indicador de una misma cama de combustible.

Palabras claves: combustión, combustibles forestales, comportamiento del fuego, factor de eficiencia de combustión, acículas.

*Autor de correspondencia
Email: marco.gonzaleztg@uanl.edu.mx
ISSN 2594-0384 (Electrónica)

Introducción

Los incendios forestales influyen en la ecología con efectos diferentes sobre la flora, fauna y las personas; desde la evolución, la adaptación y afectaciones en la salud por las emisiones generadas (Cascio, 2018). Uno de los efectos más visibles es el consumo de combustibles que se refiere a la masa vegetal viva o muerta quemada durante un incendio forestal por la reacción térmica/química, permitiendo que el combustible se oxide produciendo dióxido de carbono, agua y calor (Ottmar, 2014). Para la combustión y consumo de los combustibles en un incendio forestal influyen condiciones como las propiedades química, la cantidad, la densidad, la geometría, la continuidad de los combustibles forestales (Werth *et al.*, 2016). Así como el contenido de humedad, la compactación y la ventilación del aire entre los combustibles (Alexander y Cruz, 2017). Por ejemplo, los combustibles finos requieren menos calor para su ignición que los combustibles pesados (Ottmar, 2014), y dependen en gran medida de los cambios de la temperatura del aire y la humedad relativa (Prichard *et al.*, 2017).

La composición de especies forestales en una comunidad vegetal influye en la productividad y acumulación de los combustibles, así como en las propiedades físicas y químicas determinando la variación de la inflamabilidad, el comportamiento el fuego y consumo de acuerdo al estrato (Cornelissen *et al.*, 2017; Grootemaat *et al.*, 2017). Los efectos del fuego, como la mortalidad de los árboles pueden aumentar después de varios años del incendio (Bär *et al.*, 2018). Esto resalta la importancia de generar modelos de predicción de consumo para mejorar la gestión de incendios y planificación de quemas prescritas (Fernandes y Loureiro, 2013; Prichard *et al.*, 2017). Sin embargo, generar modelos es complejos debido a la combinación de múltiples factores como el tamaño del incendio, la carga de combustible antes del incendio, el consumo de combustible y el tiempo atmosférico (Drury *et al.*, 2014).

La combustión es un proceso influenciada por factores como el combustible, el viento, el paisaje y la geometría del fuego (O'Brien *et al.*, 2018). El proceso se desarrolla por cuatro fases con duraciones que dependen de las características y estructura de los combustibles, tipo de incendio, el tiempo atmosférico y la topografía; y está a su vez influye en la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por un incendio forestal (Kreye *et al.*, 2014; Ottmar, 2014; Cascio, 2018).

La combustión inicia con una fase de pre-ignición en la cual los combustibles del frente del fuego reciben temperaturas de 325 a 355 °C por radiación y convección liberando la humedad de los combustibles. La segunda fase es la combustión en llama que se desarrolla entre 500 a 1900 °C liberando mayor energía, consumiendo mayores combustibles. La tercera es la combustión lenta reduciendo la intensidad de energía liberada entre 300 a 600 °C, pero con mayor impacto por la reducción de la velocidad de propagación afectando la capa orgánica del suelo y los combustibles pesados. Finalmente, la fase de combustión latente que es el consumo lento de residuo, capa orgánica y combustibles podridos con temperaturas similares a la fase sin llama (Keeley, 2009; Kreye *et al.*, 2014; Ottmar, 2014).

Conocer el consumo de combustibles por un incendio forestal permite conocer los efectos por el fuego, así como estimar la pérdida de carbono (Fernandes y Loureiro, 2013; Reid *et al.*, 2012). Esto debido a que los bosques con altas acumulaciones de combustibles forestales son seguidos por actividades de perturbación como ataque de plagas, daños por ventarrones e incendios forestales (Brewer *et al.*, 2013). Para el caso de incendios forestales los combustibles finos (<0.6 cm de diámetro) y la capa de hojarasca son los principales determinantes del comportamiento del fuego y los primeros en consumirse (Fernandes y Loureiro, 2013).

En ecosistemas mexicanos son pocos los estudios respecto al consumo de combustibles en quemas prescritas o incendios forestales, tales como Cofer *et al.* (1993), Díaz-Hernández *et al.* (2021), Flores-Garnica y Benavides-Solorio (1995), Rodríguez-Trejo (2018), Yokelson *et al.* (2007, 2009, 2011). Pero ninguno de ellos habla de ecuaciones de predicción de consumo. Por lo que nuestro trabajo es la primera que trata del consumo y generación de ecuaciones a partir de quema de muestras de camas de combustibles forestales de pino-encino y pino-oyamel de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Materiales y métodos

Diseño de lecho de combustibles

Para este estudio colectamos capas de hojarasca de pino-oyamel (*Pinus* sp.-*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), y pino-encino (*Pinus* sp.-*Quercus* sp.), en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Para cada comunidad arbórea colectamos

18 muestras de 1 m^2, las secamos en horno de secado NOVATECH a 79 °C para obtener su peso seco usando una báscula PTS3000. Obtuvimos la densidad aparente dividiendo el peso seco de la capa de hojarasca colectado con el producto del área colectado, y medimos el promedio del grosor de la capa de hojarasca en el área colectada usando una regla de 30 cm. Colectamos el combustible disponible en un metro cuadrado, la cual no fue la misma en todos los cuadrantes, debido que en algunos cuadrantes había más y en otros menos, esto influyó en pesos no uniformes para todas las áreas colectadas. Diseñamos una plataforma metálica resistente al calor de 225 x 50 cm (Figura 1), mediante una combinación del diseño y metodología usado por Sikkink *et al.* (2017), y Sánchez-Monroy *et al*. (2019). Montamos la plataforma a 13 cm sobre el suelo, con soportes que permitieron establecer tres condiciones de pendiente (0, 10, 20°).

Quema de combustibles

Para las quemas, extendimos la capa de hojarasca colectada uniformemente sobre la plataforma metálica y las comprimimos a mano para lograr un grosor homogéneo. Realizamos las quemas en las instalaciones de la CONAFOR-Morelia, Michoacán, en los meses de enero y febrero de 2021, en un horario de 10 a 15 h del día. Iniciamos las quemas en un buffer de 25 cm en el borde inicial de la plataforma compuesta de acículas de pino. No controlamos las condiciones ambientales, por lo que registramos la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa usando un medidor meteorológico de bolsillo Kestrel ®3000. Durante las quemas el promedio de la temperatura ambiente fue de 29 °C, 35% de humedad relativa y 2.24 km hr^{-1} de velocidad del viento a la altura de la plataforma metálica. Para cada condición de pendiente realizamos 6 réplicas (Tabla 1).



Figura 1. Plataforma metálica de quema de las capas de hojarasca.

Tabla 1. Características de las capas de hojarascas quemadas.

Capa de hojarasca	Pendiente de inclinación de la plataforma (°)	Carga de combustible Prequemado (kg m^2)		Grosor de la capa de hojarasca (mm)		Densidad aparente (Kg m^3)	
		M	sd	M	sd	M	sd
Pino-encino	0	0.70	0.17	8.38	3.11	9.74	4.77
Pino-encino	10	0.39	0.21	7.50	2.74	5.05	1.08
Pino-encino	20	0.56	0.25	4.83	3.19	15.17	10.82
Pino-oyamel	0	0.50	0.22	4.92	3.26	11.41	2.68
Pino-oyamel	10	0.33	0.05	8.75	2.09	3.92	1.03
Pino-oyamel	20	0.71	0.29	9.00	4.18	8.50	3.57

Medición de consumo de combustibles

El consumo lo obtuvimos mediante la diferencia del peso seco de la capa de hojarasca pre y post quema incluyendo residuos carbonizados y la ceniza. El residuo carbonizado se refiere al combustible carbonizado que no se consumió por completo. También calculamos el factor de eficiencia de combustión (BEF) empleando la formula propuesto por Russell-Smith *et al*. (2009).

$$\mathrm{BEF} = 1 - \frac{\mathrm{Mash}}{\mathrm{Mfuel}}$$

Donde:

BEF= Factor de eficiencia de combustión

Mash= Carga residual de hojarasca no quemado más carga de ceniza

Mfuel: Carga de hojarasca prequemada

Resultados

Consumo de combustibles por quemas de acículas

Previo a la quema, no hubo variación significativa en la carga de combustible entre pino-encino y pino-oyamel. Las quemas redujeron la carga de combustibles respecto a la carga inicial, $F_{1,31}$= 115.32, p< 0.001. Después de las quemas, el combustible no consumido, el consumo de combustible y los residuos carbonizados no variaron significativamente entre las dos camas de combustibles comparadas, pero la cantidad de residuo fue más constante en pino-oyamel. La ausencia de variación del consumo fue porque el factor de eficiencia de combustión no varío entre camas de combustibles, $F_{1,31}$= 3.961, p= 0.055. En pino-oyamel el rango del factor de eficiencia de combustión fue de 0.35 a 0.79 con promedio de 0.60 y en pino-encino fue de 0.04 a 0.81 con promedio de 0.45. Obtuvimos amplio rango del factor de eficiencia de combustión en pino-encino con muestras que presentaron menos del 20% del área total quemada.

De acuerdo a la pendiente, la carga de combustibles fue diferente antes de las quemas, la cual siguió siendo diferentes después de las quemas. Pero el factor de eficiencia de combustión y el residuo carbonizado no variaron entre pendientes en las camas de combustibles quemadas, esto se reflejó en que el consumo de combustible no difirió entre pendientes (Tabla 2). En las tres pendientes el valor promedio del factor de eficiencia de combustión fue similar con rango entre 0.04 a 0.25, 0.31 a 0.81, 0.76 a 0.79 en las pendientes de 0, 10 y 20 °, respectivamente. En efecto, el consumo de combustible correlacionó positivamente con el residuo carbonizado (r= 0.67, p< 0.001), mientras que de acuerdo a las pendientes la relación fue negativa (r= -0.06, p= 0.65), encontrando que en pendiente de 20° donde el consumo fue ligeramente mayor el residuo carbonizado fue menor.

Los variables del comportamiento del fuego, la carga de combustible y la densidad aparente correlacionaron significativamente con el consumo (Tabla 3). De igual manera las variables del comportamiento del fuego, la carga de combustible quemada y el grosor de la cama de acículas

Tabla 2. Promedio y desviación estándar en kg m^{-2} del consumo de las capas de hojarascas en las tres condiciones de pendiente (n= 48).

Variable	0°	10°	20°
Pino-encino	0.19 (0.18)	0.20 (0.11)	0.29 (0.17)
Pino-oyamel	0.26 (0.10)	0.21 (0.04)	0.36 (0.18)

Tabla 3. Correlación del consumo, porcentaje de consumo y residuo carbonizado con la carga de combustible quemada, densidad aparente, grosor de la cama de acículas quemada y el comportamiento del fuego.

Parámetros	Consumo	Porcentaje de consumo	Residuo carbonizado
Consumo	-	-	0.67*
Carga prequema	0.77*	0.25	0.59*
Densidad aparente	0.38*	0.25	-0.02
Grosor de cama de acículas	0.52*	0.21	0.70*
Velocidad de propagación	0.69*	0.49*	0.66*
Longitud de la flama	0.72*	0.51*	0.82*
Altura de la flama	0.77*	0.50*	0.83*
Intensidad de línea de fuego	0.84*	0.56*	0.74*
Angulo de separación del fuego	0.26	0.44*	0.54*

* Significancia de p< 0.05.

correlacionaron fuerte y significativamente con el residuo carbonizado. Por lo que la altura de la flama, la intensidad de línea de fuego y el consumo estimaron significativamente la producción de residuos carbonizados.

Al no encontrar variación de consumo entre pino-encino y pino-oyamel se generaron ecuaciones lineales mixtos (n= 37) aplicables para ambas camas de combustibles. Las variables predictoras fueron significativas en las ecuaciones con ausencia de colinealidad (Factor de inflación de varianza (VIF)= 2.94). La ecuación 1 de la tabla 4 estima el consumo a partir de la carga de combustible prequema y el factor de eficiencia, la cual mejoró al considerar la intensidad de línea de fuego y la tasa de propagación (Ecuación 2 de la Tabla 4). La ecuación predictora del factor de eficiencia (Ecuación 3 de la Tabla 4), tuvo como predictor la carga de combustible de la prequema y el consumo de combustible. La residual carbonizada dependió del consumo, la intensidad de línea de fuego y la altura de la flama (Ecuación 4 de la Tabla 4). Estas ecuaciones indican buena tendencia en el ajuste de datos observados y predichos, sin embargo, el residual carbonizado muestra una distribución más dispersa entre los puntos (Figura 2).

Discusiones

La carga de acículas quemadas y el comportamiento del fuego correlacionan fuertemente con el consumo de combustibles y los residuos carbonizados. La alta correlación entre la capa de hojarasca y el consumo se ha obtenido también en quemas prescritas de pino y encino (Ottmar *et al.*, 2016). El porcentaje de consumo obtenido en nuestras pruebas son similares en promedio a los obtenidos en quemas experimentales de bosque de *Pinus pinaster* Ait. de Portugal (Fernandes y Loureiro, 2013), y bosque de pino en el suroeste de Estados Unidos de América (Yokelson *et al.*, 2013). Nuestras quemas mostraron que en hojarasca mixta de pino y encino el consumo de combustible no fue homogéneo. Esto debido al mayor porcentaje de hojas de encino en el metro cuadrado quemado influyendo en el tiempo de ignición de los combustibles del frente del fuego. Además, se observó que el borde de las hojas de encino fue carbonizado sin consumirse completamente. Esto indica que el consumo puede variar de acuerdo a la composición heterogénea del combustible, por ejemplo, Brewer *et al*. (2013), encontraron que el tamaño de partículas influyó en la carbonización y consumo de combustible. Incluso

Tabla 4. Ecuaciones de estimación de consumo por las quemas de acículas realizadas (n= 37).

No.	Ecuación	Coeficiente		SE	R	R^2
Consumo						
1	Consumo= a + b (wPre) + c (BEF)	a	-0.277	0.040	0.91	0.91
		b	0.464	0.037		
		c	0.564	0.083		
2	Consumo= a + b (wPre) + c (BEF) + d (RI) + e (ROS)	a	-0.180	0.041	0.94	0.93
		b	0.338	0.045		
		c	0.448	0.052		
		d	0.001	0.000		
		e	-0.051	0.021		
3	BEF= a + b (wPre) + c (Consumo)	a	0.509	0.042	0.89	0.88
		b	-0.755	0.065		
		c	1.553	0.106		
4	ResiduoC = a + b (Consumo) + c (IR) + d (HF)	a	-0.003	0.005	0.514	0.47
		b	0.049	0.027		
		c	-0.0002	0.000		
		d	0.123	0.035		

wPre-Carga de combustible quemada (kg m^2); BEF-Factor de eficiencia de combustión; IR-Intensidad de línea de fuego (Kw m^{-1}); ROS-Tasa de propagación (m min^{-1}); ResiduoC-Residuo carbonizado (kg m^2); HF-Altura de la flama (m); PorCons-Proporción de combustible quemado (kg m^2); SE-error estándar. Todas las ecuaciones fueron significativas con valor $p<0.05$.

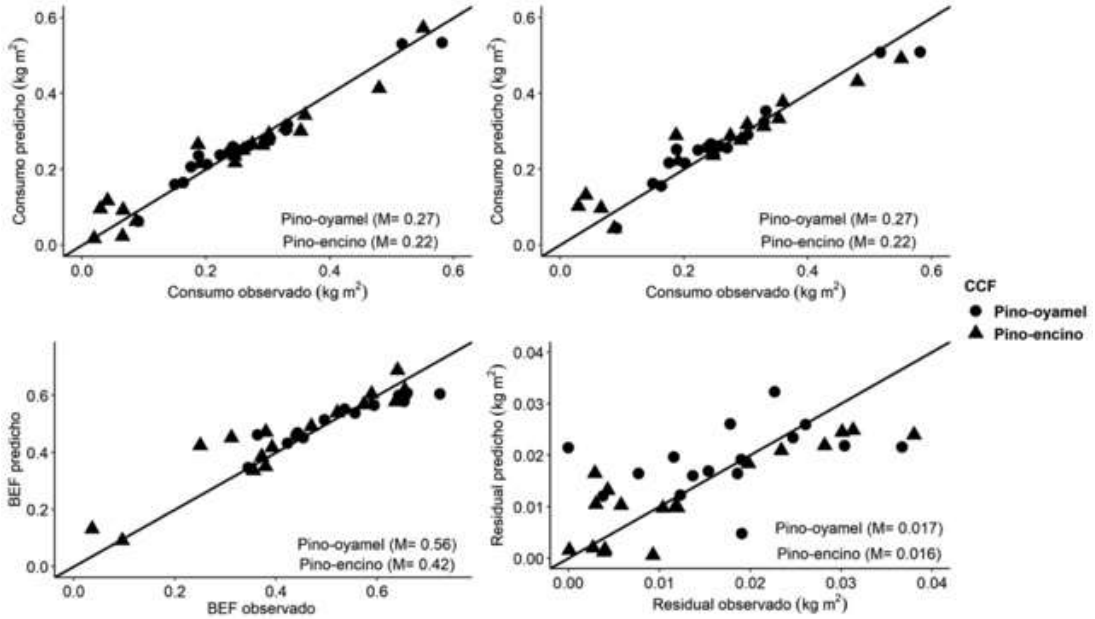


Figura 2. Gráficos de consumo (gráfico superior izquierdo corresponde a la ecuación 1, gráfico superior derecho corresponde a la ecuación 2), factor de eficiencia de combustión (BEF), y residuo carbonizado observados y predichos.

el consumo puede variar en un mismo géneros de árboles (Weir y Limb, 2013), y en comunidades heterogéneos de especies arbóreas, presentando variación de mortalidad después de un incendio forestal (Hood *et al*., 2018). Por lo que, se pueden encontrar irregularidades en un incendio forestal con presencia de islas con hojarascas no quemadas, las cuales son importares como área de refugio para la fauna y la flora (Meddens *et al.*, 2018). Por lo tanto, es importante identificar las áreas no quemados dentro de un incendio forestal y evaluar los cambios post incendio, y cómo reaccionan las plantas al calor recibido durante el incendio.

En nuestra quema no consideramos el material leñoso caído, sin embargo, estudios como Brewer *et al*. (2013), y Knapp *et al.* (2005), encontraron que el consumo del material leñoso caído varía de acuerdo al tamaño de los combustibles leñosos, con mayor residuo carbonizado en áreas con mayor carga de material leñoso caído mayores a 7.6 cm, ya que las partículas leñosas grandes no se consumen por completo. Sin embargo, si hay ignición en los combustibles pesados la longitud de flama es mayor aumentando la liberación de energía y de gases calientes. Esto aumentaría la carbonización de la parte inferior del dosel, con lesiones visibles en la parte superior del mismo e incluso iniciar un incendio de copa por la radiación y convección (Hood *et al.*, 2018; Varner *et al*., 2021).

El consumo de la capa de hojarasca por las ecuaciones está determinado fuertemente por la carga de combustible antes de la quema, así como lo indica también Brewer *et al*. (2013), Fernandes y Loureiro (2013), Wright (2013), y Prichard *et al.* (2017). Todas las variables predictoras de los modelos se pueden determinar en campo, antes y durante un incendio forestal o quema prescrita. Sin embargo, este trabajo solo considera la capa de hojarasca, por lo que al considerar todos los estratos el consumo aumentaría considerablemente. Para quemas prescritas o incendios forestales los modelos de consumo obtenidos en este trabajo pueden subestimar el consumo debido a que la integración de factores como la humedad de los combustibles y la topografía influyen en el comportamiento del fuego y la permanencia del fuego en un mismo lugar influyendo en el consumo.

Las variables predictores del consumo incluyen además de la carga de combustible antes del incendio, la humedad de hojarasca, la densidad aparente de la hojarasca, la temperatura del ambiente, la humedad relativa, la energía liberada por el fuego, el tipo de vegetación, el área basal del rodal y en quemas prescritas la temporada en la que esta se realiza (Knapp *et al.*, 2005; Reid *et al.*, 2012), e inclusive la estación del año (Wright, 2013). La generación de las ecuaciones indica también la importancia de conocer con precisión el

consumo de combustible para poder estimar las emisiones de gases durante un incendio. Sin embargo, hay que considerar que el consumo de combustible por un incendio varía de acuerdo a la región y clima, por lo que es necesario tener ecuaciones regionales para predecir el consumo de combustible (Prichard *et al.*, 2017). Nuestras ecuaciones al ser empíricas deben considerarse conservadoras al no integrar otros factores y estratos del sotobosque, y ser aplicables en condiciones similares a la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y estén en el rango de los datos de este trabajo.

Conclusiones

Este trabajo consideró el consumo de combustibles con la premisa que hay diferencia entre camas y pendiente. Los resultados rechazaron esta premisa indicando que el consumo por quemas de la capa de hojarasca entre pino-oyamel y pino-encino es similar. El factor de eficiencia de combustión y los residuos carbonizados después de las quemas no variaron entre las camas de combustibles. Las pendientes no influyeron en el consumo, factor de eficiencia de combustión y residuos carbonizados. La carga de combustible antes de la quema, el factor de eficiencia de combustión y el comportamiento del fuego fueron los predictores significativos para el consumo de combustible. Las ecuaciones obtenidas son aplicables para la capa de hojarasca, las cuales pueden mejorar si se considera la carga absoluta de todos los estratos antes y después de aplicación de quemas prescritas. Se deben de realizar más experimentos de consumo de combustibles en camas de combustibles mexicanas y generar ecuaciones para predecir el consumo de combustibles, así como realizar evaluaciones en quemas prescritas que se han implementado en los últimos años en México.

Agradecimiento

El primer autor agradece al CONAHCyT por la beca de posgrado otorgada. A los comisariados ejidales y comunidades de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca por el permiso para entrar en sus propiedades y a las personas que nos acompañaron en las colectas en campo. Al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM, Campus Morelia por el secado de la capa de hojarasca. A CONAFOR-Morelia, Michoacán por el espacio prestado para realizar las quemas de la capa de hojarascas.

Referencias

Alexander, M.E., Cruz, M.G. 2017. Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. *International Journal of Wildland Fire*, 26(4): 95–113, ISSN: 10498001, DOI: 10.1071/WF11001.

Bär, A., Nardini, A., Mayr, S. 2018. Post-fire effects in xylem hydraulics of *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica*. *New Phytologist*, 217(4): 1484–1493, ISSN: 1469-8137, DOI: 10.1111/NPH.14916.

Brewer, N.W., Smith, A.M.S., Hatten, J.A., Higuera, P.E., Hudak, A.T., Ottmar, R.D., Tinkham, W.T. 2013. Fuel moisture influences on fire-altered carbon in masticated fuels: An experimental study. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(1): 30–40, ISSN: 21698961, DOI: 10.1029/2012JG002079.

Cascio, W.E. 2018. Wildland Fire Smoke and Human Health. *The Science of the total environment*, 624: 586, DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.086.

Cofer, W.R., Levine, J.S., Winstead, E.L., Stocks, B.J., Cahoon, D.R. y Pinto, J.P. 1993. Trace gas emissions from tropical biomass fires: Yucatan Peninsula, Mexico. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 27(12): 1903–1907, ISSN: 0960-1686, DOI: 10.1016/0960-1686(93)90295-A.

Cornelissen, J.H.C., Grootemaat, S., Verheijen, L.M., Cornwell, W.K., van Bodegom, P.M., van der Wal, R. Aerts, R. 2017. Are litter decomposition and fire linked through plant species traits? *New Phytologist*, 216(3): 653–669, ISSN: 1469-8137, DOI: 10.1111/NPH.14766.

Díaz-Hernández, D., Rodríguez-Laguna, R., Rodríguez-Trejo, D.A., Acevedo-Sandoval, A. Maycotte-Morales, C. 2021. *Pinus montezumae* regeneration dynamics after a forest fire and a prescribed burn. *Botanical Sciences*, 99(1): 58–66, ISSN: 20074476, DOI: 10.17129/BOTSCI.2634.

Drury, S.A., Larkin, N. (Sim), Strand, T.T., Huang, S., Strenfel, S.J., Banwell, E.M., O'Brien, T.E. Raffuse, S.M. 2014. Intercomparison of fire size, fuel loading, fuel consumption, and smoke emissions estimates on the 2006 tripod fire, Washington, USA. *Fire Ecology*, 10(1): 56–83, ISSN: 19339747, DOI: 10.4996/fireecology.1001056.

Fernandes, P.M. Loureiro, C. 2013. Fine fuels consumption and CO_2 emissions from surface fire experiments in maritime pine stands in northern Portugal. *Forest Ecology and Management*, 291: 344–356, ISSN: 0378-1127, DOI: 10.1016/j.foreco.2012.11.037.

Flores-Garnica, J.G. Benavides Solorio, J.D.D. 1995. Efectos de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rosal de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 20(77).

Grootemaat, S., Wright, I.J., van Bodegom, P.M. Cornelissen, J.H.C. 2017. Scaling up flammability from individual leaves to fuel beds. *Oikos*, 126(10): 1428–1438, ISSN: 1600-0706, DOI: 10.1111/OIK.03886.

Hood, S.M., Varner, J.M., Van Mantgem, P. Cansler, C.A. 2018. Fire and tree death: Understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. *Environmental Research Letters*, 13(11), ISSN: 17489326, DOI: 10.1088/1748-9326/aae934.

Keeley, J.E. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1): 116–126, ISSN: 10498001, DOI: 10.1071/WF07049.

Knapp, E.E., Keeley, J.E., Ballenger, E.A. Brennan, T.J. 2005. Fuel reduction and coarse woody debris dynamics with early season and late season prescribed fire in a Sierra Nevada mixed conifer forest. *Forest Ecology and Management*,

208(1–3): 383–397, ISSN: 03781127, DOI: 10.1016/j.foreco.2005.01.016.

Kreye, J.K., Brewer, N.W., Morgan, P., Varner, J.M., Smith, A.M.S., Hoffman, C.M. Ottmar, R.D. 2014. Fire behavior in masticated fuels: A review. *Forest Ecology and Management*, 314: 193–207, ISSN: 03781127, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.11.035.

Meddens, A.J.H., Kolden, C.A., Lutz, J.A., Smith, A.M.S., Cansler, C.A., Abatzoglou, J.T., Meigs, G.W., Downing, W.M. Krawchuk, M.A. 2018. Fire Refugia: What Are They, and Why Do They Matter for Global Change? *BioScience*, 68(12): 944–954, ISSN: 0006-3568, DOI: 10.1093/BIOSCI/BIY103.

O'Brien, J.J., Hiers, J.K., Varner, J.M., Hoffman, C.M., Dickinson, M.B., Michaletz, S.T., Loudermilk, E.L. Butler, B.W. 2018. Advances in Mechanistic Approaches to Quantifying Biophysical Fire Effects. *Current Forestry Reports*, 4(4): 161–177, ISSN: 21986436, DOI: 10.1007/S40725-018-0082-7/FIGURES/7.

Ottmar, R.D. 2014. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Modeling fuel consumption. *Forest Ecology and Management*, 317: 41–50, ISSN: 0378-1127, DOI: 10.1016/J.FORECO.2013.06.010.

Ottmar, R.D., Hudak, A.T., Prichard, S.J., Wright, C.S., Restaino, J.C., Kennedy, M.C. Vihnanek, R.E. 2016. Pre-fire and post-fire surface fuel and cover measurements collected in the south-eastern United States for model evaluation and development - RxCADRE 2008, 2011 and 2012. *International Journal of Wildland Fire*, 25(1): 10–24, ISSN: 10498001, DOI: 10.1071/WF15092.

Prichard, S.J., Kennedy, M.C., Wright, C.S., Cronan, J.B. Ottmar, R.D. 2017. Predicting forest floor and woody fuel consumption from prescribed burns in southern and western pine ecosystems of the United States. *Data in Brief*, 15: 742–746, ISSN: 2352-3409, DOI: 10.1016/J.DIB.2017.10.029.

Reid, A.M., Robertson, K.M. Hmielowski, T.L. 2012. Predicting litter and live herb fuel consumption during prescribed fires in native and old-field upland pine communities of the southeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(8): 1611–1622, DOI: 10.1139/X2012-096.

Rodríguez-Trejo, D.A., Pulido-Luna, J.A., Martínez-Muñoz, P., Martínez-Lara, P.J. Monjarás-Vega, N.A. 2018. Análisis comparativo de quemas prescritas aplicadas a encinares tropicales. *Agrociencia, ISSN-e 1405-3195, Vol. 52, Nº. 6, 2018, págs. 783-801*, 52(6): 783–801, ISSN: 1405-3195.

Rstudio Team, 2020. *RStudio: Integrated Development Environmental for R (Version 4.0.3.). RStudio, PBC, Boston, MA.* no. 4.0.3, Rstudio, PBC, Boston, MA, R Foundation for Statistical Computing.

Russell-Smith, J., Murphy, B.P., Meyer, C.P. (Mick), Cook, G.D., Maier, S., Edwards, A.C., Schatz, J. Peter, B. 2009. Improving estimates of savanna burning emissions for greenhouse accounting in northern Australia: limitations, challenges, applications. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1): 1–18, ISSN: 1448-5516, DOI: 10.1071/WF08009.

Sánchez-Monroy, X., Mell, W., Torres-Arenas, J. Butler, B.W. 2019. Fire spread upslope: Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal*, 108: 102844, ISSN: 0379-7112, DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2019.102844.

Sikkink, P.G., Jain, T.B., Reardon, J., Heinsch, F.A., Keane, R.E., Butler, B. Baggett, L.S. 2017. Effect of particle aging on chemical characteristics, smoldering, and fire behavior in mixed-conifer masticated fuel. *Forest Ecology and Management*, 405: 150–165, ISSN: 03781127, DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.008.

Varner, J.M., Hood, S.M., Aubrey, D.P., Yedinak, K., Hiers, J.K., Jolly, W.M., Shearman, T.M., McDaniel, J.K., O'Brien, J.J. Rowell, E.M. 2021. Tree crown injury from wildland fires: causes, measurement and ecological and physiological consequences. *New Phytologist*, 231(5): 1676–1685, ISSN: 1469-8137, DOI: 10.1111/NPH.17539.

Weir, J.R. Limb, R.F. 2013. Seasonal variation in flammability characteristics of *Quercus marilandica* and *Quercus stellata* leaf litter burned in the laboratory. *Fire Ecology*, 9(3): 80–88, ISSN: 19339747, DOI: 10.4996/fireecology.0903080.

Werth, P.A., Potter, B.E., Alexander, M.E., Clements, C.B., Cruz, M.G., Finney, M.A., Forthofer, J.M., Goodrick, S.L., Hoffman, C., Jolly, W.M., McAllister, S.S., Ottmar, R.D. Parsons, R.A. 2016. Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume 2 for Fire Behavior Specialists, Researchers, and Meteorologists. *General Technical Report PNW-GTR-891*, 2(March): 258.

Wright, C.S. 2013. Models for Predicting Fuel Consumption in Sagebrush-Dominated Ecosystems. *Rangeland Ecology & Management*, 66(3): 254–266, ISSN: 1550-7424, DOI: 10.2111/REM-D-12-00027.1.

Yokelson, R.J., Burling, I.R., Gilman, J.B., Warneke, C., Stockwell, C.E., De Gouw, J., Akagi, S.K., Urbanski, S.P., Veres, P., Roberts, J.M., Kuster, W.C., Reardon, J., Griffith, D.W.T., Johnson, T.J., Hosseini, S., Miller, J.W., Cocker III, D.R., Jung, H. Weise, D.R. 2013. Coupling field and laboratory measurements to estimate the emission factors of identified and unidentified trace gases for prescribed fires. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(1): 89–116, ISSN: 16807316, DOI: 10.5194/acp-13-89-2013.

Yokelson, R.J., Burling, I.R., Urbanski, S.P., Atlas, E.L., Adachi, K., Buseck, P.R., Wiedinmyer, C., Akagi, S.K., Toohey, D.W. Wold, C.E. 2011. Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(14): 6787–6808, DOI: 10.5194/ACP-11-6787-2011.

Yokelson, R.J., Crounse, J.D., DeCarlo, P.F., Karl, T., Urbanski, S., Atlas, E., Campos, T., Shinozuka, Y., Kapustin, V., Clarke, A.D., Weinheimer, A., Knapp, D.J., Montzka, D.D., Holloway, J., Weibring, P., Flocke, F., Zheng, W., Toohey, D., Wennberg, P.O., Wiedinmyer, C., Mauldin, L., Fried, A., Richter, D., Walega, J., Jimenez, J.L., Adachi, K., Buseck, P.R., Hall, S.R. Shetter, R. 2009. Emissions from biomass burning in the Yucatan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15): 5785–5812, ISSN: 16807324, DOI: 10.5194/ACP-9-5785-2009.

Yokelson, R.J., Urbanski, S.P., Atlas, E.L., Toohey, D.W., Alvarado, E.C., Crounse, J.D., Wennberg, P.O., Fisher, M.E., Wold, C.E., Campos, T.L., Adachi, K., Buseck, P.R. Hao, W.M. 2007. Emissions from forest fires near Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(21): 5569–5584, ISSN: 16807324, DOI: 10.5194/acp-7-5569-2007..