

Emisión de gases de efecto invernadero por incendios forestales en tres comunidades arbóreas de Michoacán

Greenhouse gas emission due to forest fires in three tree communities in Michoacán

Rubén Ortiz-Mendoza¹ , Marco Aurelio González-Tagle¹ , Diego Rafael Pérez-Salicrup² ,
Oscar Alberto Aguirre-Calderón¹ , Wibke Himmelsbach¹ ,
Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez¹ 

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Nacional km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua carretera a Pátzcuaro 8701. CP. 58190. Morelia, Michoacán, México.

*Autor de correspondencia: marco.gonzaleztg@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 17 de mayo de 2024

Aceptado: 18 de septiembre de 2024

RESUMEN. Los incendios forestales consumen grandes cantidades de combustible forestal y emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera, principalmente de CO₂ y CO. El objetivo de este trabajo fue calcular las emisiones en quemas de la capa de hojarasca, así como las emisiones considerando todos los estratos vegetales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca que nos indiquen si las comunidades arbóreas corresponden o no a una misma cama de combustible. Para lo cual se quemó la capa de hojarasca de las comunidades arbóreas de oyamel, pino-oyamel y pino-encino. También se usó el programa CONSUME para calcular las emisiones de todos los estratos. Se obtuvo que la capa de hojarasca con menor emisión total correspondió a oyamel con 46 gr kg⁻¹ respecto a los 647 y 437 gr kg⁻¹ registrados en pino-oyamel y pino-encino, respectivamente, (p<0.05). Se obtuvieron modelos de predicción de emisión de CO₂, CO, CH₄, NO₂ y NO_x que explicaron el 74% de las emisiones generadas por las quemadas. Con CONSUME se obtuvo mayor emisión en la comunidad de oyamel. La emisión presentó una correlación de 85% con el consumo, con 43% más de consumo en combustible de baja humedad respecto a los combustibles con alta humedad. Las comunidades integradas por pino no presentaron variación de emisión, pero la elevada carga de combustibles influyó en una alta emisión, por lo que la reducción de la carga de combustibles reduciría significativamente la presencia y potencial de un incendio forestal, así como las emisiones.

Palabras clave: Comportamiento del fuego, ecuaciones de estimación, factor de eficiencia de combustión, fases de combustión, quema de acículas.

ABSTRACT. The forest fires consume large amounts of forest fuel and emit greenhouse gases into the atmosphere, mainly CO₂ and CO. The objective of this work was to calculate the emission from burning of the litter layer, and to calculate the emissions considering all vegetation strata in the Mariposa Monarch Biosphere Reserve to Indicate If the arboreal community correspond or not to same fuelbeds. For this purpose, the litter layer in arboreal community the oyamel, pine-oyamel and pine-oak was burned. The CONSUME program was used to calculate emissions of all the strata. It was obtained that the litter layer with the lowest total emissions corresponded to fir with 46 g kg⁻¹ compared to 647, and 437 g kg⁻¹ recorded in pine-fir and pine-oak, respectively (p< 0.05). Emission prediction models were obtained for CO₂, CO, CH₄, NO₂ and NO_x, which explained 74% of the emissions generated from burning. With CONSUME, the oyamel community obtained higher emissions. The emission presented a correlation of 85% with consumption, with 43% higher consumption in low humidity fuels compared to high humidity fuels. Communities composed of pine did not show any variation in emissions, the high fuel load influences a high emission from a fire, so that a higher emission from a fire can be expected.

Keywords: Fire behavior, estimation equations, combustion efficiency factor, combustion phases, burning of needles.

Como citar: Ortiz-Mendoza R, González-Tagle MA, Pérez-Salicrup DR, Aguirre-Calderón OA, Himmelsbach W, Cuéllar-Rodríguez LG (2025) Emisión de gases de efecto invernadero por incendios forestales en tres comunidades arbóreas de Michoacán. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(1): e4184. DOI: 10.19136/era.a12n1.4184.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera (Cascio 2018). El efecto más visible de un incendio forestal es el consumo de la masa vegetal viva o muerta mediante un proceso de combustión. La combustión está influenciada por el combustible, el viento, el paisaje y la geometría del fuego (O'Brien *et al.* 2018). El incendio se desarrolla por cuatro fases (pre-ignición, flameante, humeante, residual) con duraciones definidas por los combustibles, tipo de incendio, el tiempo atmosférico y la topografía; con variación de emisión de gases de efecto invernadero en cada una de las fases (Kreye *et al.* 2014, Ottmar 2014). En un incendio forestal se emiten cientos de compuestos químicos a la atmósfera principalmente monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxido de nitrógeno (NO_x), carbono orgánico volátil (VOC), partículas de carbono (PM) de 2.5 y 10 micras, entre otros (Kreye *et al.* 2014, Hao y Larkin 2014). Estas emisiones contribuyen al cambio climático y afectan a la salud humana (Fernández-Alonso *et al.* 2017).

La cantidad de gases de efecto invernadero emitidos aumenta de acuerdo con el tamaño de un incendio forestal y la emisión de GEI afecta la calidad del aire e influye en la presencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, con mayor efecto en la población local o regional de interfaz urbano-forestal (Reid *et al.* 2016, Rappold *et al.* 2017, Cascio 2018). Los efectos de las GEI emitidas resalta la importancia de generar modelos de predicción de las emisiones para mejorar la gestión de incendios, planificación de quemas prescritas, evaluar el impacto de un incendio forestal a la calidad del aire y la salud humana e identificar las áreas de mayor emisión. Sin embargo, generar modelos es complejo debido a que hay que considerar múltiples factores como el tamaño del incendio, la carga de combustibles antes del incendio, el consumo de combustible y las condiciones atmosféricas (Fernandes y Loureiro 2013, Drury *et al.* 2014, Prichard *et al.* 2017).

La emisión de GEI en incendios forestales se puede calcular mediante muestras de humo producto de incendios (Yokelson *et al.* 2009); y de quemas prescritas. De igual manera se puede obtener las emisiones usando el software CONSUME y First Order Effects Model (FOFEM) considerando el tipo de combustible del rodal (Drury *et al.* 2014). Otra forma es mediante quema de biomasa en laboratorio (Pokhrel *et al.* 2021), pero, es necesario el uso de ecuaciones. Las cuales consideran la superficie quemada, la carga de combustibles, el factor de consumo, y el contenido medio de carbono como lo señalan las ecuaciones del IPCC (2003), y la mejorada por Russell-Smith *et al.* (2009) al considerar la gravedad del incendio y una corrección del área quemada, debido a que los incendios presentan parches no quemados que sobreestiman la predicción.

Para ecosistemas mexicanos son pocos los estudios que tratan de emisiones generadas a partir de los incendios forestales o quemas prescritas, tales como Cofer *et al.* (1993) en selvas tropicales de península de Yucatán; Rodríguez-Trejo *et al.* (2018, 2020) en encinar tropical, pastizal y sabana en Chiapas; Yokelson *et al.* (2007, 2009, 2011) en bosques templados del centro del país, pastizales y selvas tropicales de la península de Yucatán; e para incendios forestales de todo México (Corona-Núñez *et al.* 2020). Los trabajos usan la ecuación del IPCC por lo que el presente trabajo es el primero que usa la ecuación eliminando el área de islas de combustibles no quemadas. Debido a lo anterior, el objetivo fue estimar las emisiones de GEI emitidas en quemas de la capa de hojarasca de tres comunidades arbóreas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, además de usar el

programa CONSUME integrado en Fuel Fire Tools para estimar la emisión considerando todos los estratos presentes en el rodal. La premisa fue obtener diferencia entre comunidades arbóreas que sugieran que estas corresponden a diferentes camas de combustibles forestales, la cual es una unidad de paisaje homogéneo con un ambiente único o similar de combustión que determina el comportamiento y efecto del fuego (Ottmar *et al.* 2007). Esto para identificar si se deben aplicar diferentes manejos de combustibles para la reducción de la carga y emisión de GEI en caso de un incendio forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de cama de combustibles para quemas

Se colectaron aleatoriamente 54 muestras (18 por comunidad arbórea) de 1 m² de acuerdo con la metodología usada por Sikkink *et al.* (2017). Las muestras estaban integradas de la capa de hojarasca compuesta de acículas de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), pino-oyamel (*Pinus* sp. – *A. religiosa*) y pino-encino (*Pinus* sp. - *Quercus* sp.) distribuidas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Se omitieron los conos y combustibles leñosos, debido a que el interés fue conocer la emisión para la capa de hojarasca. Las colectas se etiquetaron y colocaron en bolsas para posteriormente transportarlos al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM, Campus Morelia, Michoacán para su secado en un horno de secado NOVATECH a 79 °C hasta obtener un peso seco constante de acuerdo con Morfín-Ríos *et al.* (2012).

Posterior al secado se trasladaron las muestras a las instalaciones del Conafor-Morelia. Las muestras se colocaron sobre una plataforma metálica de 200 x 50 cm (Sikkink *et al.* 2017), resistente al calor para su quema instalada en un área abierta. Las muestras se extendieron en forma uniforme sobre la plataforma para luego iniciar la quema en un buffer compuesta de acículas. Todas las quemas se realizaron en enero y febrero de 2021 en un horario de 10:00 a 15:00 horas. Durante las quemas no se controló el efecto del viento por lo que se registró la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa usando un Kestrel 3000. El promedio de las variables ambientales fue de 2 km hr⁻¹ para la velocidad del viento, 29 °C de temperatura y 36% de humedad relativa. Las quemas se grabaron con una cámara digital Nikon D5300, posteriormente usando el programa Kinovea, de acceso libre se midió cada 5 segundos la geometría de la flama (altura, longitud y ángulo) para emplearlas en la generación de ecuaciones de estimación.

Cálculo de consumo y emisiones por quemas de acículas

Después del enfriamiento de la plataforma de quema se recogió y pesó los combustibles no quemados en conjunto con las cenizas producto de la combustión. El consumo resultó de la diferencia entre el peso seco de combustibles antes y después de las quemas. Para obtener la emisión de las quemas se emplearon las fórmulas propuestas por Russell-Smith *et al.* (2009) definidas en función de las clases de combustible.

Para estimar el CH₄, CO, CO₂, se aplicó la siguiente formula:

$$E_C = EF * AP * FL * BEF * CC * M$$

Para estimar el NO₂ y NO_x, se determinó con la siguiente formula:

$$E_N = EF * AP * FL * BEF * CC * NC * M$$

Donde: Ec= Emisión para CH₄, CO, CO₂, EN= Emisión para NO₂ y NO_x, EF = Factor de emisión obtenido de Akagi *et al.* (2011). 1 637 para CO₂, 89 para CO, 3.92 para CH₄, 2.51 para NO_x, 0.16 para NO₂, AP= Área quemada corregida por las islas no quemadas, FL= Carga de combustibles prequemada, CC=Contenido de carbono del combustible, se usó el estándar de 46%, NC= Relación nitrógeno/carbono de combustible (0.011), M = Relación de la masa molecular a la masa elemental por cada especie, y BEF = Factor de eficiencia de combustión

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

Donde: Mash = Carga residual de combustibles no quemado más carga de ceniza, y Mfuel = Carga de combustibles prequemada.

Predicción de emisión por Fuel Fire Tools

Debido a los resultados de las quemas de la capa de hojarasca, usamos el Sistema de Clasificación de Características de Combustibles (FCCS, por sus siglas en inglés) versión 4.0, y el complemento de CONSUME versión 5.0 integradas en Fuel Fire Tools (FFT) para obtener el consumo y las emisiones de 84 sitios para la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (28 sitios por comunidad arbórea). Para la predicción se usaron datos de la capa de fermentación, capa de hojarasca, herbáceas, material leñoso caído (MLC), arbustos y dosel; además de la humedad de combustible predeterminada por CONSUME y el porcentaje de consumo por estrato según Fire Emission Production Simulator (FEPS) (Tabla 1). Para cada sitio se obtuvo el consumo y la emisión para cada condición de humedad. Las emisiones obtenidas fueron el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dióxido de azufre (SO₂), amoníaco (NH₃), hidrocarburos distintos del metano (NMOC), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas de 2.5 micras (PM_{2.5}), partículas de 10 micras (PM₁₀).

Tabla 1. Simulación del consumo de combustibles en el Software CONSUME, bajo diferentes escenarios de contenido de humedad de los combustibles.

Condiciones de humedad	Humedad en combustibles (%)			Consumo (%) ³		
	1000 hr ¹	Duff ²	Litter ²	Arbustos	Dosel	Apilamientos
Muy baja (D2L1)	8	26	15	89	86	99
Baja (D2L2)	12	38	25	86	80	95
Moderada (D2L3)	15	42	31	80	63	90
Alta (D2L4)	31	97	86	63	40	80

¹obtenidos de Drury *et al.* (2014), ²obtenidos de muestras de campo, ³obtenido de Fire Emission Production Simulator (FEPS).

Análisis estadístico

Para analizar los datos de la quema de hojarasca se omitió la comunidad arbórea de oyamel ya que solo en tres muestras se obtuvo consumo debido a que el fuego no avanzó por falta de continuidad en los combustibles. Para la predicción en CONSUME se consideraron las tres

comunidades arbóreas, primero se obtuvo el consumo y posteriormente la emisión. Los datos obtenidos de las quemas y por CONSUME se trasformaron a logarítmicos cuando no cumplieron los supuestos de normalidad. Para los datos de las quemas se comparó la emisión entre comunidades arbóreas mediante un ANOVA, al igual, para los datos de CONSUME se comparó la emisión entre comunidades arbóreas y escenarios de humedad con un ANOVA. Al obtener diferencias significativas se realizó una prueba post hoc de Tukey. Se consideraron significativos con valor $p < 0.05$. Se emplearon regresiones lineales para generar modelos empíricos para estimar la emisión en función de la carga de la prequema y geometría del fuego. Todos los análisis estadísticos se realizaron usando Rstudio (R Core Team 2020).

RESULTADOS

Las muestras quemadas no presentaron variación significativa en emisión entre pino-oyamel y pino-encino; las quemas generaron 647, 437 y 46 gr kg^{-1} de emisión de gases para pino-oyamel, pino-encino y oyamel, respectivamente, de las cuales el 97% correspondió a CO_2 y el 3% a CO, CH_4 , NO_2 y NO_x . (Tabla 2). Al no tener variación en emisiones entre pino-oyamel y pino-encino se generaron ecuaciones de estimación aplicables para ambas comunidades arbóreas, donde las variables predictoras fueron significativas ($p < 0.05$) sin multicolinealidad con valor de inflación de la variancia (VIF) máximo de 1.71. Los predictores significativos de las ecuaciones fueron el porcentaje de consumo, la carga de combustible quemada y la altura de flama (Tabla 3), las cuales indicaron buena tendencia en el ajuste observados y predichos (Figura 1).

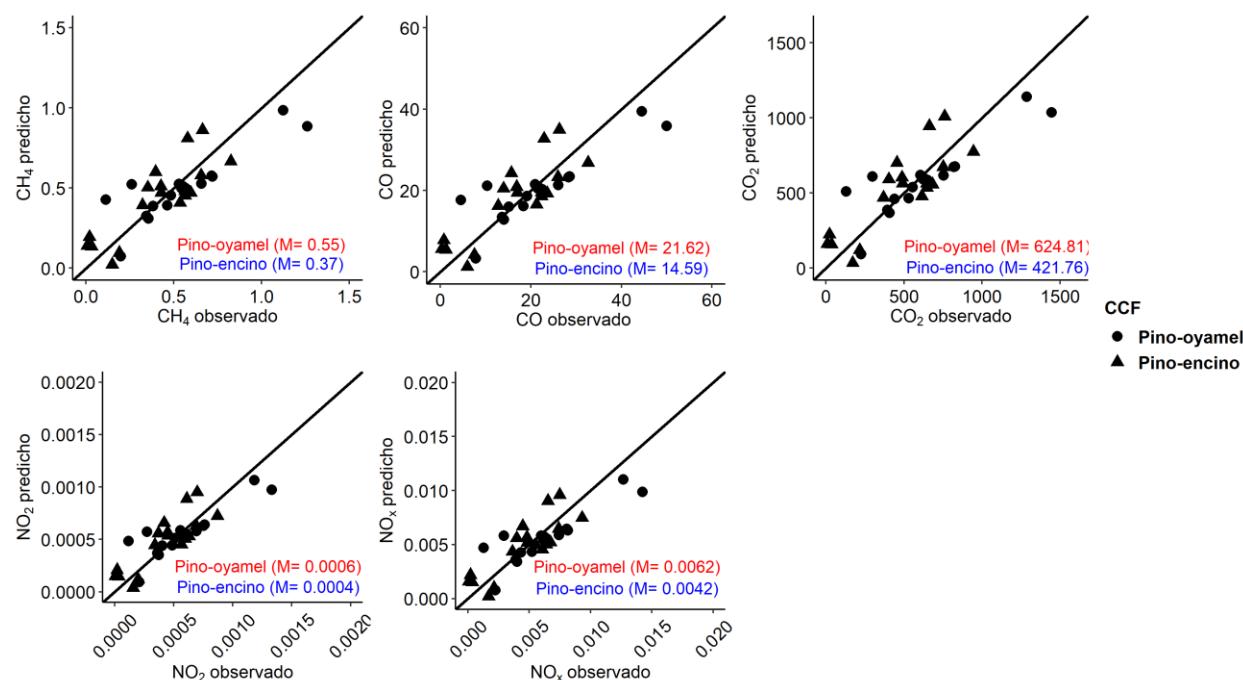
Tabla 2. Emisiones obtenidas de las quemas de acículas y por CONSUME en las tres comunidades arbóreas.

Gases	Oyamel		Pino-oyamel		Pino-encino	
	Media \pm sd	Rango	Media \pm sd	Rango	Media \pm sd	Rango
Quema de acículas (gr kg^{-1})						
CO_2	44.85 \pm 109.57	0 - 328.46	624.81 \pm 341.52	130.00 - 1 445.09	421.76 \pm 295.93	2.69 - 944.24
CO	1.55 \pm 3.79	0 - 11.37	21.62 \pm 11.82	4.50 - 50.00	14.59 \pm 10.24	0.09 - 32.67
CH_4	0.04 \pm 0.10	0 - 0.29	0.55 \pm 0.30	0.11 - 1.26	0.37 \pm 0.26	0.01 - 0.82
NO_x	0.000 4 \pm 0.001 1	0 - 0.003 2	0.006 2 \pm 0.003 4	0.001 3 - 0.014 3	0.004 2 \pm 0.003	0.000 03 - 0.009
NO_2	0.000 1 \pm 0.000 1	0 - 0.000 3	0.000 6 \pm 0.000 3	0.000 12 - 0.001	0.000 4 \pm 0.000 3	0 - 0.000 8
CONSUME (kg ha^{-1})						
CO_2	93 626 \pm 41 259	29 921 - 231 781	70 802 \pm 29 801	19 299 - 155 564	72 082 \pm 33 185	23 205 - 190 313
CO	5 069 \pm 2 484	1 579 - 14 852	3 868 \pm 1 726	1 052 - 8 938	2 386 \pm 1 098	768 - 6 299
CH_4	230.28 \pm 119.71	69.39 - 725.90	176.47 \pm 81.78	47.85 - 417.54	101.46 \pm 46.71	32.66 - 267.88
NO	104.86 \pm 49.84	33.27 - 294.55	79.82 \pm 34.98	21.73 - 182.07	71.24 \pm 32.80	22.93 + 188.90
NO_x	80.94 \pm 34.70	24.87 - 188.37	61.30 \pm 25.38	16.65 - 131.80	110.10 \pm 50.69	35.44 - 290.68
NO_2	76.36 \pm 32.82	23.57 - 179.02	57.60 \pm 23.98	15.70 - 124.64	66.06 \pm 30.41	21.26 - 174.42
SO_2	79.95 \pm 36.80	25.79 - 213.96	60.70 \pm 26.13	16.53 - 136.43	21.16 \pm 9.74	6.82 - 55.85
NH_3	55.10 \pm 28.20	16.76 - 170.49	42.18 \pm 19.35	11.47 - 99.20	25.91 \pm 11.93	8.34 - 68.39
NMOC	1 531 \pm 679	493 - 3 838	1 158 \pm 489	316 - 2 554	1 165 \pm 536	375 - 3 075
PM_{10}	915.11 \pm 432.86	291.07 - 2 553.0	696.32 \pm 304.33	189.57 - 1 584.96	327.62 \pm 150.83	105.47 - 865.01
$\text{PM}_{2.5}$	823.68 \pm 389.61	261.99 - 2 297.9	626.75 \pm 273.93	170.63 - 1 426.61	294.89 \pm 135.76	94.94 - 778.56

Tabla 3. Ecuaciones para estimar emisión por quemas de acículas para pino-oyamel y pino-encino.

No.	Ecuación	R	R ²	p
1	CH ₄ = -0.462 + 0.009 (PorCons) + 0.726 (wPre) + 0.573 (HF)	0.74	0.71	<0.001
2	CO = -18.328 + 0.367 (PorCons) + 28.78 (wPre) + 22.724 (HF)	0.74	0.72	<0.001
3	CO ₂ = -529.672 + 10.602 (PorCons) + 831.728 (wPre) + 656.725 (HF)	0.74	0.72	<0.001
4	NO ₂ = -0.00049 + 0.00001 (PorCons) + 0.00077 (wPre) + 0.000610 (HF)	0.74	0.72	<0.001
5	NO _x = -0.00522 + 0.00010 (PorCons) + 0.0082 (wPre) + 0.00647 (HF)	0.74	0.72	<0.001

wPre: Carga de combustible quemada (kg m²), HF: Altura de la flama (m), PorCons: Proporción de combustible quemado (kg m²).


Figura 1. Gráficos de emisiones observados y predichos para las ecuaciones de estimación de emisión.

Con el programa CONSUME se obtuvo variación de consumo de combustibles en oyamel, mientras que entre pino-oyamel y pino-encino fueron similares (Tabla 4). Además, el consumo fue mayor en escenario de baja y muy baja humedad.

Tabla 4. Consumo de combustibles (t ha⁻¹) por quema de acículas y predichas por CONSUME en tres comunidades arbóreas.

	Cama de combustible (p < 0.001, F _{2, 324} = 18.924)				Escenario de humedad (p < 0.001, F _{3, 324} = 27.427)		
	Oyamel	Pino-oyamel	Pino-encino	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
	Media ± sd	42.94 ± 18.13	43.18 ± 19.88	33.16 ± 14.45	45.34 ± 18.85	54.14 ± 22.30	57.84 ± 23.60
Rango	18.3 - 142.3	11.7 - 94.7	13.9 - 114.0	11.7 - 104.5	14.4 - 123.5	16.4 - 136.8	17.6 - 142.3
Grupo	a	b	b	c	b	a	a

El total de emisión fue mayor en oyamel, seguida por pino-oyamel y pino-encino con 77 628.66, 76 652.11 y 102 591.98 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2). La mayor emisión predicha corresponde al dosel. Del total de emisiones el 94% corresponden al CO₂ y el resto a CO, CH₄, NH₃, NO, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y NMOC. En cuando a los escenarios de humedad, hubo una variación del 43% de emisión de gases entre el escenario de alta humedad a la humedad muy baja (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de emisiones predichas por CONSUME en los escenarios de humedad para la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. IC95% = Intervalo de confianza de 95%.

	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
CH ₄ (p < 0.001, F _{3, 324} = 26.280)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	121.16 ± 78.57 ^a	161.68 ± 93.66 ^b	190.63 ± 105.27 ^{ab}	204.14 ± 110.46 ^a
CI95%	104.11 - 138.21	141.36 - 182.01	167.79 - 213.48	180.16 - 228.11
CO (p < 0.001, F _{3, 324} = 28.205)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	2 674 ± 1 586 ^c	3 599 ± 1 939 ^b	4 262 ± 2 213 ^{ab}	4 561 ± 2 329 ^a
CI95%	2 329 - 3 018	3 178 - 4 019	3 782 - 4 742	4 055 - 5 066
CO ₂ (p < 0.001, F _{3, 324} = 32.351)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	54 826 ± 23 602 ^c	75 053 ± 30 945 ^b	89 675 ± 36 707 ^a	95 793 ± 38 871 ^a
CI95%	49 703 - 59 947	68 337 - 81 768	81 709 - 97.641	87 357 - 104 228
NH ₃ (p < 0.001, F _{3, 324} = 26.771)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	29.29 ± 18.25 ^c	39.18 ± 21.86 ^b	46.26 ± 24.65 ^{ab}	49.52 ± 25.88 ^a
CI95%	25.33 - 33.25	34.44 - 43.93	40.91 - 51.61	43.91 - 55.14
NMOC (p < 0.001, F _{3, 324} = 32.058)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	894 ± 390 ^c	1 223 ± 508 ^b	1 461 ± 601 ^a	1 560 ± 637 ^a
CI95%	809 - 978	1 112 - 1 333	1 329 - 1 591	1 422 - 1 698
NO (p < 0.001, F _{3, 324} = 29.290)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	60.08 ± 29.87 ^c	81.31 ± 37.03 ^b	96.57 ± 42.69 ^a	103.28 ± 44.93 ^a
CI95%	53.6 - 66.56	73.27 - 89.34	87.31 - 105.84	93.52 - 113.03
NO ₂ (p < 0.001, F _{3, 324} = 33.559)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	46.15 ± 18.81 ^c	63.45 ± 25.28 ^b	75.97 ± 30.33 ^a	81.12 ± 32.21 ^a
CI95%	42.07 - 50.23	57.96 - 68.93	69.39 - 82.55	74.13 - 88.11
NO _x (p < 0.001, F _{3, 324} = 33.716)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	58.18 ± 27.14 ^c	79.95 ± 37.11 ^b	95.73 ± 44.70 ^a	102.23 ± 47.66 ^a
CI95%	52.29 - 64.07	71.90 - 88.01	86.03 - 105.43	91.89 - 112.57
SO ₂ (p < 0.001, F _{3, 324} = 30.497)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	37.85 ± 25.51 ^c	51.39 ± 32.74 ^b	61.14 ± 38.22 ^a	65.36 ± 40.49 ^a
CI95%	32.31 - 43.38	44.29 - 58.5	52.85 - 69.44	56.57 - 74.14
PM ₁₀ (p < 0.001, F _{3, 324} = 29.463)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	455.63 ± 286.98 ^c	616.11 ± 360.26 ^b	731.45 ± 416.41 ^{ab}	782.21 ± 439.88 ^a
CI95%	393.35 - 517.91	537.93 - 694.29	641.08 - 821.81	686.75 - 877.67
PM _{2.5} (p < 0.001, F _{3, 324} = 29.463)				
Media ± sd (kg ha ⁻¹)	410.11 ± 258.31 ^c	554.56 ± 324.27 ^b	658.37 ± 374.80 ^{ab}	704.06 ± 395.93 ^a
CI95%	354.05 - 466.16	484.19 - 624.93	577.03 - 39.71	618.14 - 798.98

^{a,b,c} = Grupos de variaciones significativas (Tukey p ≤ 0.05).

DISCUSIÓN

La altura de la flama de las quemas se correlacionó de forma positiva y significativa con las emisiones, las cuales tuvieron relación positiva con el consumo de combustibles, y con la carga de combustible. La mayor carga de combustibles en la comunidad arbórea de oyamel influyó en mayor consumo de combustibles, lo que indica que el consumo y la emisión están en función de la carga de combustible, pero también de la altura de la flama. Comparativamente, las quemas realizadas emitieron poca emisión respecto a los bosques templados durante un incendio forestal emiten en promedio 1 637, 89, 3.92, 0.16, 2.51 g kg⁻¹ de CO₂, CO, CH₄, NO₂, NO_x, respectivamente (Akagi *et al.* 2011). Para zonas montañosas de la Ciudad de México, Yokelson *et al.* (2007, 2011) encontraron emisiones de 1 662 y 1 603, 82.9 y 102.6, 4.96 y 5.70, 5.03 y 3.19, 7.44 y 3.66 g kg⁻¹, respectivamente, para cada gas mencionado anteriormente. Para quemas prescritas de bosque de pino con sotobosque la emisión encontrada por Yokelson *et al.* (2013) fue de 1 668, 72.2, 3.01, 2.55, 2.68, g kg⁻¹ para CO₂, CO, CH₄, NO₂, NO_x, respectivamente, y de manera similar Akagi *et al.* (2014) encontró emisiones de 1 646.9, 100.6, y 2.68 g kg⁻¹ para CO₂, CO, y CH₄, respectivamente. Por otra parte, para la capa de hojarasca y el suelo orgánico la emisión encontrada por Urbanski (2014) fue de 1 305, 271, 7.47, 0.67 g kg⁻¹ en CO₂, CO, CH₄, NO_x, respectivamente.

La variación de gases emitidos indica que los tipos de vegetación, las comunidades arbóreas y los estratos presentes en el sotobosque influyen en la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera durante un incendio. La baja emisión de N₂O y NO_x se debe a que la capa orgánica del suelo emite menor cantidad de gases en comparación con la vegetación del sotobosque y el dosel en quemas prescritas o incendios forestales de acuerdo con los resultados de Yokelson *et al.* (2013), Urbanski (2014) y Paton-Walsh *et al.* (2014).

Las emisiones obtenidas por las quemas son bajas por kilogramo quemado. Por lo que, al no encontrar variación de emisión entre dominancias arbóreas por la quema de hojarasca, se puede considerar que estas al estar integrada de acículas de pino en ambas comunidades arbóreas pudo influir en el consumo y emisión similar. Por lo que CONSUME al considerar los estratos del sotobosque, indica que la emisión puede variar de acuerdo con los estratos considerados, la carga de combustible disponible a consumirse y la humedad de los combustibles.

Durante un incendio forestal la emisión es mayormente de CO₂ debido a la pérdida significativamente del almacenamiento de carbono por el consumo, principalmente de las plántulas, arbustos, material leñoso caído y capa orgánica (Miesel *et al.* 2018). Por ejemplo, Rodríguez-Trejo *et al.* (2020) encontraron variación de consumo y emisión de CO₂ en quemas prescritas realizadas en pastizal y sabana en Chiapas; con diferentes emisiones por estrato de combustible y comportamiento del fuego de acuerdo con la pendiente y viento. Las quemas de hojarasca indicaron que estas emiten menos del 3% de las emisiones, en comparación al dosel que emite más del 70% seguida por el MLC y arbustos.

Además, es importante conocer la dirección del penacho de humo generado de un incendio forestal y evaluar la concentración de las emisiones respecto a la distancia del incendio. Debido a que la emisión puede variar de acuerdo a la distancia entre un incendio forestal con una población urbana, como encontró Yokelson *et al.* (2011) para NO_x y NH₃ que fueron mayores en incendios forestales



más cercanos a las zonas urbanas. Además de las emisiones de gases, es importante conocer la emisión de partículas (PM) de 10 y 2.5 micras ya que influyen en problemas respiratorios y cardiovasculares fuertes a muy fuertes como se ha encontrado en incendios de Norte América y Europa (Rappold *et al.* 2017, Cascio 2018).

La mayor emisión de CO₂ se debe también a que el consumo es mayor en la fase de flama, en la cual se libera mayor cantidad de CO₂ (Akagi *et al.* 2011, Paton-Walsh *et al.* 2014). Para el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca las áreas dominadas por *Abies religiosa* y *Pinus* sp. es mayor el carbono aéreo que en áreas con *Quercus* sp. (Ramírez *et al.* 2019). Estas áreas coinciden con ser las que mayor consumo y emisión tendrían en caso de un incendio de acuerdo con lo obtenido por CONSUME por la carga de combustibles disponible.

En áreas de mayor acumulación de combustibles como las áreas protegidas, un incendio forestal puede reducir significativamente la carga, tal como encontró Ruiz-Corzo *et al.* (2022) en bosques de *Pinus oocarpa* de Chiapas, donde un incendio forestal disminuyó la capa de hojarasca y mantillo a más del 50%, y en menor cantidad en el material leñoso de 100 y 1 000 horas. Por lo que un incendio forestal podría afectar en una alta mortalidad, daños en el follaje del dosel por el calor radiactivo y convección generando dosel carbonizado. Teniendo en cuenta que la carga de combustibles varía de acuerdo a los combustibles del sotobosque y que estos influyen en la emisión de gases, se requiere conocer la carga por estrato, la humedad de combustible e incluso la topografía como mencionan Kasischke y Hoy (2012) y Fernandes y Loureiro (2013).

Las ecuaciones de predicción de emisión de la capa de hojarasca obtenidos consideran la carga de combustible antes de la quema, el porcentaje de consumo y la altura de la flama. Esta última es una variable que puede definir la intensidad de calor liberado en la línea de fuego y tiene alta correlación con el consumo ($r= 0.77$, $p< 0.001$), por lo que su integración en la ecuación aumenta la adopción del uso del modelo. La generación de las ecuaciones indicó la importancia de conocer con precisión el consumo de combustible para estimar las emisiones. Por lo que, para mayor precisión de predicción de emisiones es indispensable realizar quemas en campo donde se pueda evaluar la relación del tiempo atmosférico, la topografía con el consumo de combustibles. Pero, es complicado realizar pruebas en áreas protegidas por el limitado manejo de combustible y uso del fuego, lo cual aumenta la carga de combustibles e incrementa el potencial del fuego (Bentley y Penman 2017). Por lo que, realizar quemas con muestras de los combustibles del sotobosque permite obtener las emisiones y generar ecuaciones de predicción de estas.

La variación de consumo y emisión varían de acuerdo a la región y clima, por lo que es necesario tener ecuaciones regionales de predicción (Prichard *et al.* 2017). Las 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 o que estén en el rango de los datos de este trabajo. Por lo que los resultados son un indicador de grandes emisiones en caso de un incendio forestal de gran magnitud en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Para reducir las emisiones se debe considerar tratamiento de manejo de combustibles forestales de acuerdo con la dominancia arbórea, esto para disminuir el potencial del fuego y las emisiones en caso de un incendio forestal.

CONCLUSIONES

Los resultados de las quemas mostraron que las emisiones de la capa de hojarasca entre pino-oyamel y pino-encino son similares. Al considerar todos los combustibles del sotobosque, se predijo que el consumo y las emisiones aumentaron en relación con la carga de combustible disponible en las comunidades arbóreas y la humedad de los combustibles. La comunidad arbórea de oyamel presentó el mayor consumo y emisión, seguida por pino-oyamel y pino-encino. Con las emisiones obtenidas, es necesario implementar estrategias de manejo y tratamiento de reducción de combustibles específicas para cada comunidad arbórea, debido a que hay evidencias de que estas pueden corresponder a diferentes capas de combustible. Se recomienda reducir la carga de combustibles en áreas de oyamel, seguidas de áreas con pino, lo cual permitirá disminuir el potencial del fuego y el avance vertical del fuego hacia la copa de los árboles en caso de un incendio forestal.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONAHCYT por la beca de posgrado otorgada. A los comisariados ejidales y comunidades de la RBMM 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.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Akagi SK, Burling IR, Mendoza A, Johnson TJ, Cameron M, Griffith DWT, Paton-Walsh C, Weise DR, Reardon J, Yokelson RJ (2014) Field measurements of trace gases emitted by prescribed fires in southeastern US pine forests using an open-path FTIR system. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14(1): 199-215. <https://doi.org/10.5194/acp-14-199-2014>

Akagi SK, Yokelson RJ, Wiedinmyer C, Alvarado MJ, Reid JS, Karl T, Crounse JD, Wennberg PO (2011) Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11(9): 4039-4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>

Bentley PD, Penman TD (2017) Is there an inherent conflict in managing fire for people and conservation? *International Journals of Wildland Fire* 26: 455-468. <https://doi.org/10.1071/WF16150>

Cascio WE (2018) Wildland fire smoke and human health. *The Science of the Total Environment* 624: 586. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.086>

Cofer WR, Levine JS, Winstead EL, Stocks BJ, Cahoon DR, Pinto JP (1993) Trace gas emissions from tropical biomass fires: Yucatan Peninsula, Mexico. *Atmospheric Environment Part A General Topics* 27(12): 1903-1907. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90295-A](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90295-A)

Corona-Núñez RO, Li F, Campo JE (2020) Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico. *Global Biogeochem Cycles* 34: e2020GB006815. <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>

Drury SA, Larkin N (Sim), Strand TT, Huang S, Strenfel SJ, Banwell EM, O'Brien TE, Raffuse SM (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. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1001056>

Fernandes PM, Loureiro C (2013) Fine fuels consumption and CO₂ emissions from surface fire experiments in maritime pine stands in northern Portugal. *Forest Ecology and Management* 291: 344-356. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.037>

Fernández-Alonso JM, Vega JA, Jiménez E, Ruiz-González AD, Álvarez-González JG (2017) Spatially modeling wildland fire severity in pine forests of Galicia, Spain. *European Journal of Forest Research* 136(1): 105-121. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-1012-5>

Hao WM, Larkin NK (2014) Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildland fire detection and burned area in the United States. *Forest Ecology and Management* 317: 20-25. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2013.09.029>

IPCC (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan. 1170 p.

Kasischke ES, Hoy EE (2012) Controls on carbon consumption during Alaskan wildland fires. *Global Changes Biology* 18(1): 685-699. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2011.02573.X>

Kreye JK, Brewer NW, Morgan P, Varner JM, Smith AMS, Hoffman CM, Ottmar RD (2014) Fire behavior in masticated fuels: A review. *Forest Ecology and Management* 314: 193-207. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.035>

Miesel J, Reiner A, Ewell C, Maestrini B, Dickinson M (2018) Quantifying changes in total and pyrogenic carbon stocks across fire severity gradients using active wildfire incidents. *Frontiers in Earth Science* 6: 1. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00041>

Morfín-Ríos JE, Jardel-Peláez EJ, Alvarado-Celestino E, Michel-Fuentes JM (2012) Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. 113p.

O'Brien JJ, Hiers JK, Varner JM, Hoffman CM, Dickinson MB, Michaletz ST, Loudermilk EL, Butler BW (2018) Advances in mechanistic approaches to quantifying biophysical fire effects. *Current Forestry Reports* 4: 161-177. <https://doi.org/10.1007/S40725-018-0082-7/FIGURES/7>

Ottmar RD (2014) Wildland fire emissions, carbon, and climate: Modeling fuel consumption. *Forest Ecology and Management* 317: 41-50. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2013.06.010>

Ottmar RD, Sandberg DV, Riccardi CL, Prichard SJ (2007) An overview of the fuel characteristic classification system-quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. *Canadian Journal of Forest Research* 2393(37): 2383-2393. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/X07-07>

Paton-Walsh C, Smith TEL, Young EL, Griffith DWT, Guérette A (2014) New emission factors for Australian vegetation fires measured using open-path Fourier transform infrared spectroscopy - Part 1: Methods and Australian temperate forest fires. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14(20): 11313-11333. <https://doi.org/10.5194/ACP-14-11313-2014>

Pokhrel RP, Gordon J, Fiddler MN, Bililign S (2021) Determination of emission factors of pollutants from biomass burning of african fuels in laboratory measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126: e2021JD034731. <https://doi.org/10.1029/2021JD034731>

Prichard SJ, Kennedy MC, Wright CS, Cronan JB, Ottmar RD (2017) Predicting forest floor and woody fuel consumption from prescribed burns in southern and western pine ecosystems of the United States. *Data Brief* 15: 742-746. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2017.10.029>

Ramírez MI, Benet D, Pérez-Salicrup DR, Skutsch M, Venegas-Pérez Y (2019) Community participation for carbon measurement in forests of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 25(3): 333-352. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2018.06.044>

Rappold AG, Reyes J, Pouliot G, Cascio WE, Diaz-Sanchez D (2017) Community vulnerability to health impacts from wildland fire smoke exposure. *Environmental Science & Technology* 51(12): 6674. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B06200>

Reid CE, Brauer M, Johnston FH, Jerrett M, Balmes JR, Elliott CT (2016) Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives* 124(9): 1334. <https://doi.org/10.1289/EHP.1409277>

Rodríguez Trejo DA, Pulido Luna JA, Martínez Muñoz P, Martínez Lara PJ, Monjarás Vega NA (2018) Análisis comparativo de quemas prescritas aplicadas a encinares tropicales. *Agrociencia* 52(6): 783-801

Rodríguez-Trejo DA, Martínez-Muñoz P, Pulido-Luna JA, Martínez-Lara PJ, Cruz-López JD (2020) Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas. *Revista de Biología Tropical* 68(2): 641-654. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.33954>

Rstudio Team (2020) RStudio: Integrated Development Environmental for R (Version 4.0.3.). RStudio, PBC, Boston, MA.

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

Sikkink PG, Jain TB, Reardon J, Heinsch FA, Keane RE, Butler B, Baggett LC (2017) Effect of particle aging on chemical characteristics, smoldering, and fire behavior mixed-conifer masticated fuel. *Forest Ecology and Management* 405: 150-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.008>

Russell-Smith J, Murphy BP, Meyer CP (Mick), Cook GD, Maier S, Edwards AC, 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. <https://doi.org/10.1071/WF08009>

Urbanski S (2014) Wildland fire emissions, carbon, and climate: Emission factors. *For Ecol Manage* 317: 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.045>

Yokelson RJ, Burling IR, Gilman JB, Warneke C, Stockwell CE, De Gouw J, Akagi SK, Urbanski SP, Veres P, Roberts JM, Kuster WC, Reardon J, Griffith DWT, Johnson TJ, Hosseini S, Miller JW, Cocker III DR, Jung H, Weise DR (2013) Coupling field and laboratory measurements to estimate the emission factors of identified and unidentified trace gases for prescribed fires. *Atmos Chem Phys* 13(1): 89-116. <https://doi.org/10.5194/acp-13-89-2013>

Yokelson RJ, Burling IR, Urbanski SP, Atlas EL, Adachi K, Buseck PR, Wiedinmyer C, Akagi SK, Toohey DW, Wold CE (2011) Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11(14): 6787-6808. <https://doi.org/10.5194/ACP-11-6787-2011>

Yokelson RJ, Crounse JD, DeCarlo PF, Karl T, Urbanski S, Atlas E, Campos T, Shinozuka Y, Kapustin V, Clarke AD, Weinheimer A, Knapp DJ, Montzka DD, Holloway J, Weibring P, Flocke F, Zheng W, Toohey D, Wennberg PO, Wiedinmyer C, Mauldin L, Fried A, Richter D, Walega J, Jimenez JL, Adachi K, Buseck PR, Hall SR, Shetter R (2009) Emissions from biomass burning in the Yucatan. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9(15): 5785-5812. <https://doi.org/10.5194/ACP-9-5785-2009>

Yokelson RJ, Urbanski SP, Atlas EL, Toohey DW, Alvarado EC, Crounse JD, Wennberg PO, Fisher ME, Wold CE, Campos TL, Adachi K, Buseck PR, Hao WM (2007) Emissions from forest fires near Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7(21): 5569-5584. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5569-2007>