

ANÁLISIS COMPARATIVO DE QUEMAS PRESCRITAS APLICADAS A ENCINARES TROPICALES

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRESCRIBED BURNS APPLIED TO TROPICAL OAK WOODLANDS

Dante A. Rodríguez-Trejo^{1*}, Jorge A. Pulido-Luna², Pedro Martínez-Muñoz³,
Pedro J. Martínez-Lara⁴, Norma A. Monjarás-Vega¹

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. km. 38.5 carretera México-Texcoco. 56230. Chapingo, Estado de México. (dantearturo@yahoo.com) (normonjaras@gmail.com). ²Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de Lerida. Avenida Rovira Roure 191, 25198 Lerida, España. (jorgepulidoluna@gmail.com). ³Biomasa, A. C. Segunda Norte no. 62, entre Tercera y Cuarta Oriente, Barrio Matzumóm. 30470. Villaflores, Chiapas. (pmtz29@hotmail.com). ⁴Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Sur Poniente 1460, Colonia Centro. 29000. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (pmtz_19@hotmail.com).

RESUMEN

Los incendios forestales y las quemaduras agropecuarias contribuyen al cambio climático global y una herramienta para reducir emisiones de CO₂ es el fuego prescrito. El objetivo de este estudio fue evaluar consumo de combustibles superficiales, comportamiento del fuego y emisiones en quemaduras prescritas. La hipótesis fue que los incendios afectan más combustibles y producen mayores emisiones que las quemaduras. En seis parcelas experimentales de un encinar tropical de Chiapas, México, establecidas al azar, se aplicaron quemaduras prescritas: tres a favor de viento y pendiente y tres en contra. Las mediciones y estimaciones incluyeron: las cargas iniciales y residuales de combustibles, factores de consumo y emisiones de CO₂. Durante las quemaduras se registraron dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, velocidad de propagación del fuego y longitud de llama. En un área bajo afectación por incendio, se determinó la longitud de la llama y la carga residual de combustibles. La prueba de "t" y la de Wilcoxon se aplicaron cuando hubo falta de normalidad. En las quemaduras a favor y en contra, las diferencias en velocidad de propagación (3.63 y 0.59 m min⁻¹) fueron significativas, pero en la longitud de llama (0.91 y 0.72 m) no. En el incendio, esta última alcanzó 1.94 m, con diferencias con respecto a las quemaduras. Las cargas totales de combustibles en quemaduras en contra y a favor fueron 28.393 y 35.512 t ha⁻¹, sin diferencias entre sí; los factores de consumo para quemadura en contra, a favor e incendio, alcanzaron 92.7, 87.5 y 97.2 %, sin diferencias, pero con afectación de combustibles aéreos por el incendio. Las emisiones de CO₂ alcanzaron 44.53, 51.14 y

ABSTRACT

Forest fires and agricultural burns contribute to global climate change, and the latter is a tool that reduces CO₂ emissions. The objective of this study was to evaluate the consumption of surface fuels, fire behavior, and emissions in prescribed burns. The hypothesis was that fires affect more fuels and produce more emissions than prescribed burns. Prescribed burns were applied in six randomly-established experimental plots in a tropical oak woodland in Chiapas, Mexico: three heading and three backing fires. Measurements and estimates included: initial and residual fuel loads, consumption factors, and CO₂ emissions. Wind speed and direction, temperature and relative humidity, fire spread rate, and flame length were recorded during the burns. In a forest fire, the flame length and the residual fuel load were determined. The t- and the Wilcoxon (under lack of normality) tests were applied. In the heading and backing fires, there were significant differences in the fire spread rate (3.63 and 0.59 m min⁻¹), but there were none in the flame length (0.91 and 0.72 m). The flame length of fires reached 1.94 m, but burns had different results. The total fuel loads in backing and heading fires were 28.393 and 35.512 t ha⁻¹, without differences between them; the consumption factors for backing and heading fires and forest fire reached 92.7, 87.5, and 97.2 %, without showing any difference; however, the forest fire affected aerial fuels. The CO₂ emissions reached 44.53, 51.14, and 53.78 t CO₂ ha⁻¹. The prescribed burns help to reduce emissions, because their intensity and severity are lower than those of forest fires. Consequently, since burns affect a smaller surface, they help to prevent fires and to reduce emissions.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2017. Aprobado: febrero, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 783-801. 2018.

Keywords: CO₂, climate change, greenhouse effect, fire, fire management.

53.78 t CO₂ ha⁻¹. Debido a su intensidad y severidad menores que en los incendios, por prevenirlos y afectar una superficie menor, las quemas prescritas son útiles para reducir emisiones.

Palabras clave: CO₂, cambio climático, efecto invernadero, fuego, manejo del fuego.

INTRODUCCIÓN

México es el país más rico en especies de *Quercus*, con 157 de ellas. La mayoría habita zonas templadas y semiáridas, pero también zonas tropicales (Zavala, 2007). La mayor parte de estos encinos está adaptada al fuego, pero en las regiones tropicales y subtropicales del país también hay especies sensibles a dicho factor, particularmente en el bosque mesófilo de montaña (Rodríguez y Myers, 2010). En Chiapas hay 31 especies de *Quercus* (Zavala, 2002). Las adaptaciones al fuego de estas especies incluyen: la semilla pequeña, pues no requiere de mucha humedad para establecerse, en comparación con las especies de semilla grande; el corresponder a etapas sucesionales iniciales, ya que colonizan sitios perturbados por agentes como el fuego; la corteza gruesa para aislar el cambium de altas temperaturas y la capacidad de rebrotación, con la que se recuperan del daño (Rodríguez y Myers, 2010; Rodríguez, 2014; López *et al.*, 2015). El fuego también tiene implicaciones sucesionales en los encinares. Por ejemplo, los encinares del este de EUA son mantenidos por el fuego, en detrimento de *Carya*, género menos tolerante a dicho factor y más mesofítico (Dickinson *et al.*, 2016).

El fuego es un factor ecológico en muchos ecosistemas del planeta (Whelan, 1997) y de México (Rodríguez, 2014), pero la alteración antropógena de los regímenes de fuego ha derivado en que los ecosistemas tropicales representen alrededor de la mitad de la superficie afectada por incendios en el mundo (Cochrane, 2009). Por ello, en los ecosistemas tropicales, para 1997-2009, los incendios representaron una emisión anual media de 2 Pg C año⁻¹ (van der Werf *et al.*, 2010).

Debido al efecto invernadero, EUA y Canadá comienzan a experimentar temporadas de incendios más largas, más incendios por rayos, mayores sequías y superficie afectada por el fuego e incendios de gran intensidad y severidad (Ryan, 2000). El cambio climático puede incrementar los efectos negativos de los incendios en diversos ecosistemas, generar mayores

INTRODUCTION

Mexico is the richest country in *Quercus* species, with 157 of them. The majority can be found in temperate and semi-arid zones, as well as in tropical zones (Zavala, 2007). Most of these oaks are adapted to fire, but some species in the tropical and subtropical regions of the country—particularly in the tropical cloud forest—are sensitive to this factor (Rodríguez and Myers, 2010). Thirty-one species of *Quercus* can be found in Chiapas (Zavala, 2002). These species have adapted to fire in several ways: small seeds—which do not require a high level of humidity to establish themselves, in comparison with large seed species—; initial successional stages—since they colonize sites disturbed by agents such as fire—; thick bark—which isolates the vascular cambium from high temperatures—, and the capacity to resprout—which allows them to recover from damage (Rodríguez and Myers, 2010; Rodríguez, 2014; López *et al.*, 2015). Fire also has successional implications for oaks. For example, oak woodlands in eastern USA are maintained by fire, to the detriment of *Carya*, a more mesophytic genus that is less tolerant to this factor (Dickinson *et al.*, 2016).

Fire is an ecological factor in many ecosystems of the planet (Whelan, 1997) and of Mexico (Rodríguez, 2014); however, the anthropogenic alteration of fire regimes has resulted in tropical ecosystems representing around half of the area affected by fires in the world (Cochrane, 2009). As a result, in the 1997-2009 period, fires represented an average annual emission of 2 Pg C year⁻¹ in tropical ecosystems (van der Werf *et al.*, 2010).

Due to the greenhouse effect, the USA and Canada begin to experience longer fire seasons, more lightning fires, increasingly severe droughts, and more areas affected by forest fires of great intensity and severity (Ryan, 2000). Climate change can increase the negative effects of fires in several ecosystems, increase greenhouse gas emissions, and hinder fire control, making it more expensive and dangerous. In addition, the extreme El Niño event in 2014-2016 generated high temperatures and drought, increased the impact of severe fires in Asia, and reduced carbon capture in the Amazon rainforest. Likewise, the temperature in Africa increased, but the precipitation remained largely the same, resulting in a higher release of CO₂. These three processes issued 3 (10)⁹ t C in 2014-

emisiones de gases efecto invernadero y representan un control de incendios más difícil, caro y peligroso. Más aún, el evento intenso del Niño 2014-2016, produjo altas temperaturas y sequía, facilitó la incidencia de fuertes incendios en Asia, y redujo la captura de C en la Amazonia. Asimismo, en África la temperatura ascendió, la precipitación se alteró poco, y el resultado fue mayor liberación de CO₂. Estos tres procesos emitieron 3 (10)⁹ t C en 2014-2016, equivalentes a 20 % de las emisiones por quema de combustibles fósiles y fabricación de cemento (Popkin, 2017).

El cambio climático global altera los factores que controlan el fuego, como temperatura, precipitación, humedad, viento, ignición, biomasa, materia orgánica muerta, composición y estructura de la vegetación, y humedad del suelo. Tales cambios amenazan un adecuado funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos (IPCC, 2001; Hassan y Ash, 2005; Shlisky *et al.*, 2007).

Las quemas prescritas tienen diversas utilidades, como abatimiento del peligro de incendio, reducción de residuos de aprovechamiento forestal, se favorece la regeneración o se prepara al sitio para la reforestación, mejoran el hábitat de la fauna silvestre, se promueve el forraje para pastoreo, se mejoran estética y acceso o se usan para el control de especies invasoras (Wade y Lunsford, 1989; Holmes *et al.*, 2011). Además pueden ayudar a reducir incendios forestales y su contribución al efecto invernadero, en ecosistemas mantenidos por el fuego, como bosques de pino y encino, incluidos los tropicales, ya que sus especies están adaptadas al fuego.

Los estudios sobre cargas de combustibles forestales, comportamiento del fuego y emisiones de gases efecto invernadero, son cruciales con diversos objetivos, como la estimación de peligro de incendio, la definición de modelos de combustibles forestales y su dinámica, la modelación del comportamiento del fuego y de sus efectos, así como la modelación de emisiones de gases efecto invernadero, tanto en incendios forestales como durante quemas.

Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: 1) determinar la carga de combustibles en un encinar tropical, 2) estudiar el comportamiento del fuego prescrito a favor y en contra de viento y pendiente, 3) establecer factores de consumo de combustibles, 4) estimar la emisión de CO₂, y 5) la severidad inmediata del fuego en cada tratamiento. La hipótesis fue que los incendios afectan más com-

2016, equivalent to 20 % of the emissions caused by the burning of fossil fuels and cement manufacturing (Popkin, 2017).

Global climate change alters the factors that control fire, including: temperature, precipitation, humidity, wind, ignition, biomass, dead organic matter, composition and structure of vegetation, and soil humidity. Such changes threaten the proper functioning of ecosystems and the provision of ecosystem services (IPCC, 2001; Hassan and Ash, 2005; Shlisky *et al.*, 2007).

The prescribed burns have different uses, such as: decreasing fire danger; reducing forest exploitation waste; favoring regeneration or preparing the area for reforestation; improving wildlife habitat; promoting the use of forage for grazing; improving aesthetics and access; and controlling invasive species (Wade and Lunsford, 1989; Holmes *et al.*, 2011). In addition, since their species are adapted to fire, they can help to reduce forest fires—and the resulting contribution to the greenhouse effect—in ecosystems maintained by fire (such as pine and oak, including the tropical ones).

Researches about forest fuel loads, fire behavior, and greenhouse gas emissions serve various crucial purposes, such as the estimation of fire danger, the definition of forest fuel models and their dynamics, and the modeling of fire behavior and its effects, as well as the modeling of greenhouse gas emissions (both during forest fires and prescribed burns).

Therefore, this study had the following objectives: 1) to determine the fuel load in a tropical oak woodland; 2) to study the behavior of prescribed burns (heading and backing fires; and slope); 3) to determine fuel consumption factors; 4) to estimate the CO₂ emission; and 5) to estimate the immediate severity of the fire in each treatment. The hypothesis was that fires affect more fuels and generate higher emissions than prescribed burns.

MATERIALS AND METHODS

Field sampling

Initial sampling, residual fuel sampling, and fuel harvesting

In February 2016, the study area was selected: a tropical oak woodland in the rural community of Villahermosa, Municipality of Villaflores, Chiapas (Figure 1). The zone has a sub-humid warm

bustibles y generan mayores emisiones que las quemas prescritas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo en campo

Muestreo inicial, de combustibles residuales y cosecha de combustibles

En febrero de 2016 se seleccionó el área de estudio, un encinar tropical en la comunidad Villahermosa, Municipio Villaflores, Chiapas (Figura 1). La zona tiene clima cálido subhúmedo (Aw_2) y le corresponden las isoterma de 22 a 24 °C, así como las isoyetas de 1200 a 1500 mm. El terreno es accidentado, predominan las rocas sedimentarias y las volcánico-sedimentarias, los suelos son regosoles y la vegetación dominante es la asociación pino-encino (Ecosur, 2018). Existen masas de encinares, donde el estudio se realizó. En estas últimas, las especies más comunes son *Quercus peduncularis* Née, *Q. skinneri* Benth. y *Q. magnoliifolia* Née. Se establecieron seis parcelas de 0.5 ha cada una. La medición de combustibles forestales involucró el establecimiento de sitios de muestreo triangulares en el centro de cada parcela, con estacas marcando los vértices (Figura 2). El diseño triangular fue con el propósito de concentrar el muestreo de combustibles lo más posible en torno de las líneas para la medición de comportamiento del fuego. Para los combustibles leñosos se empleó la metodología de intersecciones planares de Brown (1974) y para hojarasca, capa de fermentación, herbáceas dicotiledóneas, gramíneas, arbustos y regeneración, se usó el método de medición y cosecha. Los lados del triángulo de muestreo, con 12 m de longitud y con la base siguiendo la curva de nivel, se utilizaron como líneas de muestreo para combustibles leñosos. La pendiente de cada línea de muestreo del triángulo fue medida con un clinómetro Suunto®. Partiendo de cada vértice y siguiendo las

climate (Aw_2), with 22 to 24 °C isotherms and 1200- to 1500-mm isohyets. The terrain is uneven, mostly dominated by sedimentary and volcano-sedimentary rocks; it belongs to the regosol soil group and the dominant vegetation is the pine-oak association (Ecosur, 2018). Stands of oaks can be found where the study was carried out and the most common species are *Quercus peduncularis* Née, *Q. skinneri* Benth. and *Q. magnoliifolia* Née. Six 0.5-ha plots were established. The measurement of forest fuels involved the establishment of triangular sampling sites in the center of each plot, with stakes marking the vertices (Figure 2). The triangular design had the purpose of concentrating fuel sampling as much as possible around the sampling lines utilized to measure fire behavior. For woody fuels, the Brown's Planar Intercept Method (1974) was used, and for leaf litter, fermentation layer, forbs, grasses, shrubs, and regeneration, the measuring and harvest method was used. The 12-m sides of the sampling triangle—and the base following the contour line—were used as sampling lines for woody fuels. The slope of each of the triangle's sampling lines was measured with a Suunto® clinometer. Starting from each vertex and working in clockwise direction, 2-, 4-, and 12-m long overlapping lines were established. The 2-m lines were used to record the number of fuel intersections with 1 h of time lag (TR) (<0.6 cm diameter), as well as for those with 10 h of TR (0.6 to 2.5 cm). The 4-m lines were used to record the quantity of fuel intersections with 100 h of TR (2.6 to 7.5 cm). The 12-m line was used to record the intersections with materials with 1000 h of TR, both sound and rotten (>7.5 cm). In this last case, the diameter of each piece was also recorded. For each TR, 12 specimens of woody materials were collected in order to determine their specific gravity in the laboratory.

Next to each vertex square sampling sites were established on the outside of the triangle, without trampling on the area. The sites had the following dimensions (fuel type indicated in parentheses): 0.3×0.3 m, metal frame (leaf litter and fermentation layer); 1×1 m, rigid plastic frame (PVC) (forbs



Figura 1. Localización general (A) y específica (B) del área de estudio.
Figure 1. General (A) and specific (B) location of the study area.

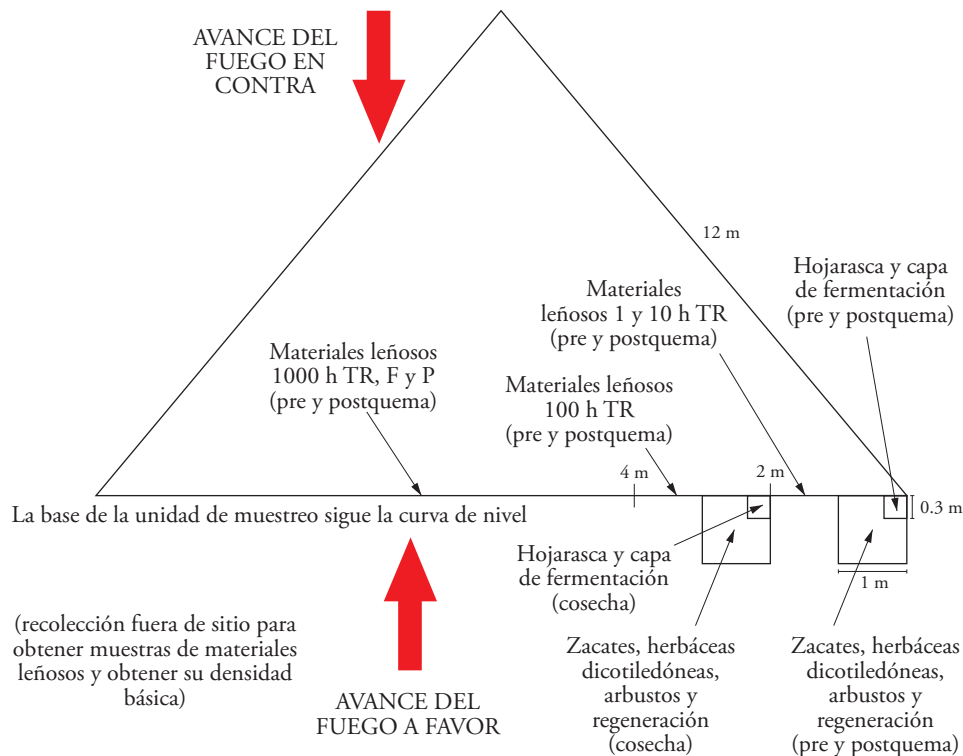


Figura 2. Conglomerado de muestreo para combustibles forestales. Se detalla el sitio 1, pero los sitios 2 y 3 (los otros lados del triángulo) tuvieron los mismos componentes y también fueron muestreados.

Figure 2. Cluster sampling for forest fuels. Site 1 is shown in detail, but sites 2 and 3 (the other sides of the triangle) had the same components and were also sampled.

manecillas del reloj, se establecieron líneas sobrepuestas de 2, 4 y 12 m de longitud. Las líneas de 2 m sirvieron para registrar el número de intersecciones de los combustibles con 1 h de tiempo de retardo (TR) (<0.6 cm de diámetro), así como para aquellos con 10 h de TR (0.6 a 2.5 cm); en las líneas de 4 m se registró la cantidad de intersecciones de los combustibles con 100 h TR (2.6 a 7.5 cm). En la línea de 12 m se registraron las intersecciones con los materiales con 1000 h TR, firmes y podridos (>7.5 cm). En este último caso, también fue anotado el diámetro de cada pieza. De cada TR se recolectaron 12 ejemplares de materiales leñosos para determinar su gravedad específica en laboratorio.

Junto a cada vértice, del lado exterior del triángulo, cuidando de no alterar por pisoteo, se establecieron sitios de muestreo cuadrados con las siguientes dimensiones para los combustibles señalados entre paréntesis: 0.3×0.3 m, marco metálico (hojarasca y capa de fermentación), 1×1 m, marco de plástico rígido (PVC) (herbáceas dicotiledóneas, zacates) y 4×4 m, con cinta métrica (arbustos y renuevo). En la hojarasca y la capa de fermentación se estimó de forma visual la cobertura (%) y se midió la profundidad de la capa (cuatro mediciones con flexómetro); para el resto de combustibles se estimó cobertura (%) y se realizaron seis mediciones de altura. De manera adicional, 2 m delante de estos sitios y en cada lado

and grasses), and 4×4 m, with measuring tape (shrubs and regeneration). The leaf litter and fermentation layer coverage (%) was estimated visually, while its layer depth was measured in four points with a measuring tape. The coverage of the remaining fuel was estimated (%) and six height measurements were made. Additionally, all the fuels were sampled again 2 m ahead of these sites and on each side of the triangle. In these last sitios, after they were measured, the materials were harvested, put in brown paper bags, labeled, and placed in plastic bags. As it is explained below, this sampling and harvest were carried out to determine dry weight.

In order to sample the different fuels, 11 sampling sites were established per side, resulting in 33 sites per triangle, and 198 sites for the six triangles. The sampling aimed at harvesting and obtaining dry weights included 6 sites per side, 18 sites per triangle, and 108 sites in total. The three fuel samplings (initial, harvest and residual) involved 504 sampling sites.

Prescribed burns and sampling of meteorological variables

As part of our experiment, six prescribed burns were carried out in March 2016. Each 0.5 ha plot where fuel was sampled

del triángulo, se repitió el muestreo para todos los combustibles. En estos últimos sitios, después de la medición los materiales se cosecharon, se pusieron en bolsas de papel estraza, se etiquetaron y colocaron en bolsas de plástico. Este muestreo y cosecha se realizó para determinar peso seco, como se explica más adelante.

Para el muestreo de los distintos combustibles se levantaron 11 sitios de muestreo por lado, 33 por triángulo y 198 en total para los seis triángulos. El muestreo para cosecha y obtención de pesos secos, incluyó 6 sitios por lado, 18 por triángulo y 108 en total. Los tres muestreos de combustibles (inicial, cosecha y residual) involucraron 504 sitios de muestreo.

Realización de quemas prescritas y muestreo de variables meteorológicas

Durante nuestro experimento se realizaron seis quemas prescritas en marzo de 2016, una cubriendo cada parcela de 0.5 ha donde se realizó el muestreo de combustibles. Tres de ellas a favor de viento y pendiente y tres en contra de viento y pendiente. La prescripción se realizó por los autores y, conforme a la norma oficial mexicana de uso del fuego NOM-015 Semarnat, se solicitó la autorización debida con fines de investigación, a la oficina de la Conafor en el municipio, el cual fue otorgado. Las quemas prescritas se realizaron por dos brigadas, una comunitaria y otra municipal, con 10 elementos cada una. Una brigada realizó las quemas y otra se mantuvo a la expectativa y lista para entrar en acción, ante una eventualidad de que el fuego se saliera de control. Las quemas fueron planificadas y dirigidas por los autores y por José Domingo Cruz López (Conanp). Para ello se previó seguridad ante posibles escapes y para el personal, con base en el Sistema para el Manejo de Incidentes. También se contó con tres brigadas comunitarias de medición, cada una con tres elementos, dirigidas y supervisadas por los autores. Tales brigadas fueron capacitadas previamente para realizar y registrar parte de las observaciones necesarias en nuestra investigación.

Las parcelas de quemas prescritas fueron representativas de las condiciones presentes en la zona y se distribuyeron aleatoriamente en una pequeña cuenca, con exposiciones N, N-NE, NE, E y SE. Las pendientes del terreno tuvieron un intervalo de 50 a 90 %, con un promedio de 73 %.

El tiempo atmosférico se registró durante la conducción de las quemas prescritas, mediante un estuche meteorológico portátil ("kit", Forestry Suppliers, Inc.[®]), que consta de anemómetro para la medición de la velocidad del viento, brújula con la cual se determinó su dirección, y un psicrómetro de cadena, para obtener temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo y estimar la humedad relativa con un nomograma (regla). Cinco observaciones de tiempo atmosférico se realizaron durante cada quema prescrita, para 30 en total.

was subject to a burn. Three of them were carried out as heading fires, and three were carried out as backing fires. The authors oversaw the prescription. Authorization for research purposes was requested from and granted by the local Conafor office, in accordance with the official Mexican Fire Use Standard NOM-015 (Semarnat). Two crews (one community and one municipal), made up by 10 elements each, carried out the prescribed burns. One crew was in charge of the burns, and the other was ready to spring into action, in case the fire went out of control. The burns were planned and directed by the authors and José Domingo Cruz López (Conanp). Security measures were implemented, in case the burns went out of hand and to protect the staff; those measures were based on the Incident Management System. In addition, three community crews oversaw the measurements; each one had three members, who were guided and supervised by the authors. These brigades had been previously trained to perform and record part of the observations that were necessary for our research.

The prescribed burn plots were representative of the conditions present in the area and they were randomly distributed in a small basin, with openings to the N, N-NE, NE, E and SE cardinal points. The slopes of the terrain had a 50 to 90 % interval (average: 73 %).

The weather was recorded during the prescribed burns, using a portable meteorological kit (Forestry Suppliers, Inc.[®]). The kit includes: an anemometer (to measure the wind speed); a compass (to determine its direction); a sling psychrometer (to obtain dry and wet bulb temperatures); and a nomogram (ruler) (to estimate the relative humidity). The weather was observed five times during each prescribed burn (30 times in total).

The fire behavior sampling line was placed in the center of the prescribed burn plot—as well as at the center of the fuel sampling triangle—, perpendicular to its base. Dry and wet bulb temperatures, as well as relative humidity, were recorded when the fire touched the first sampling stake. The direction and speed of the wind was obtained every time the fire reached each stake.

Fire behavior

Flame length (LL) and fire spread rate (VP) were measured as fire behavior variables. For this purpose, a 2 m long stake was fixed in the center of the base of the triangle to measure forest fuels, while red and white bands were painted every 0.2 m. Three stakes were placed upwards the slope and one downwards, 5 m apart from each other. The flame length was measured when it reached the stake. The VP was estimated based on the time that the fire required to cross each 5 m section. Fire behavior was measured in 18 sampling sites (Figure 3).

La línea de muestreo de comportamiento del fuego quedó enclavada en la zona central de la parcela de quema prescrita, también al centro del triángulo de muestreo para combustibles, y perpendicular a su base. Las temperaturas de bulbo seco y húmedo, así como la humedad relativa, se registraron cuando el fuego tocaba la primera estaca de muestreo. La dirección y velocidad del viento se obtuvo todas las veces que el fuego alcanzaba cada estaca.

Comportamiento del fuego

Del comportamiento del fuego se midieron las variables longitud de llama (LL) y velocidad de propagación (VP). Con este propósito, en el centro de la base del triángulo para la medición de combustibles forestales, se fijó una estaca con 2 m de longitud y con bandas rojas y blancas cada 0.2 m. Tres estacas se colocaron hacia arriba de la ladera y una estaca hacia abajo, todas distanciadas 5 m. La longitud de llama se midió cuando ésta pasaba por la estaca. La VP se estimó con base en el tiempo que el fuego tardó en recorrer cada tramo de 5 m. Hubo 18 sitios de muestreo para comportamiento del fuego (Figura 3).

Severidad inmediata del fuego en el arbolado

En cada parcela de quema se levantó un sitio de 1000 m² para árboles ≥ 2 m de altura. Se registró el género de los árboles, su altura y diámetro normal. Como variables de severidad del fuego se registraron chamuscado de copas (CHC) y altura de la cicatriz del fuego sobre el tronco (CT). En total se levantaron seis sitios de este tipo.

Muestreo de incendio forestal

Durante el muestreo de combustibles forestales, coincidió la presencia de un incendio forestal en un área cercana, el cual fue controlado por brigadas municipales y comunitarias y que afectó 10 ha. Hubo oportunidad de trasladarse y realizar seis mediciones de LL, así como tres de combustibles residuales y de severidad en el arbolado, de utilidad en el presente trabajo. La carga inicial de combustibles se consideró como el promedio de los sitios de quemados a favor y en contra, y se levantaron tres sitios de muestreo de combustibles residuales en él. También se levantaron tres sitios de muestreo de severidad en esta área.

Trabajo de laboratorio y gabinete

Carga inicial y carga residual de combustibles forestales

Las muestras de combustibles cosechados se llevaron al Laboratorio de Nutrición Animal de la Universidad Autónoma de

Immediate fire severity in the trees

In each burn plot, a 1000 m² site was settled for ≥ 2 m high trees. The genus, height, and diameter at breast height of the trees were documented. Crown scorch (CHC) and height of fire scar on trunk (CT) were recorded as fire severity variables. In total, six of this type of site were placed.

Forest fire sampling

A forest fire began in a nearby area, at the same time that the forest fuel sampling was carried out. The fire affected 10 ha, before it was controlled by municipal and community brigades. The research team had the opportunity to carry out six LL measurements, as well as three residual fuel and severity in the trees measurements, which were useful for this work. The initial fuel load was considered as the average of the heading and backing fires, and three residual fuel sampling sites were settled there. Three severity sampling sites were also placed in this area.

Laboratory and desk research

Initial and residual loads of forest fuels

The samples of harvested fuel were taken to the Laboratorio de Nutrición Animal of the Universidad Autónoma de Chiapas,

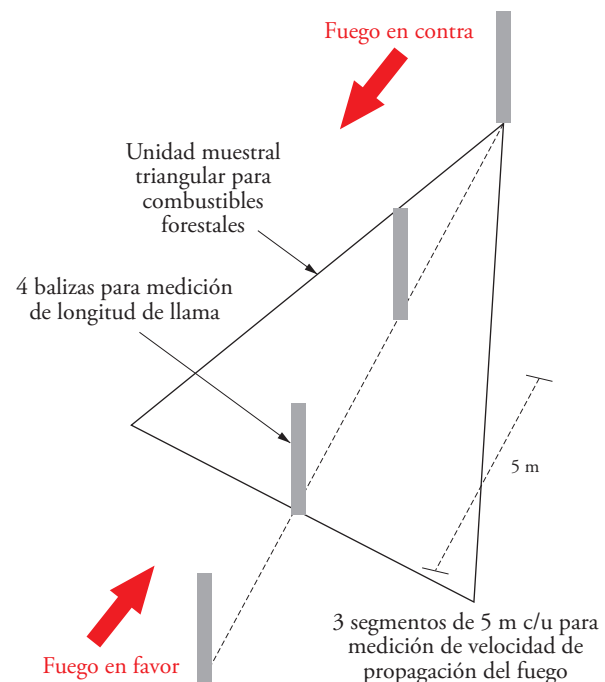


Figura 3. Medición de comportamiento del fuego.
Figure 3. Measurement of fire behavior.

Chiapas, se colocaron en hornos de secado a 70 °C y se pesaron hasta que alcanzaron peso constante. El peso seco de cada muestra se relacionó con el prisma rectangular imaginario obtenido en campo, producto de la multiplicación de cobertura (en tanto por uno) por la altura o profundidad media, según el tipo de combustible. Así se obtuvieron promedios para estimar la carga inicial, y la carga residual a las quemas prescritas, de los combustibles muestreados en campo, la cual se extrapoló a $t \text{ ha}^{-1}$.

Para los combustibles leñosos, los modelos empleados requieren de la gravedad específica de tales materiales. Ésta última se determinó a partir de las muestras de este tipo de combustibles que se recolectaron del piso forestal. Los modelos para la obtención de las cargas (C) de materiales leñosos de 1 a 100 h TR (1) y para 1000 h TR, firmes y podridos fueron (Van Wagner, 1968, Brown, 1974, Morfin *et al.*, 2012):

$$C = (k \text{ GE DCP } f \text{ c}) / (N \text{ L}) \quad (1)$$

$$C = (k \text{ GE } \sum \text{DC } c) / (N \text{ L}) \quad (2)$$

donde $k=1.234$, GE=gravedad específica, DCP=diámetro cuadrático medio, f =frecuencia de intersecciones, c =factor para la pendiente de la línea de muestreo, N =número de líneas de muestreo, L =longitud de la línea de muestreo, $\sum \text{DC}$ =sumatoria de diámetros cuadráticos.

Estimación de emisiones

El cálculo de la carga de combustible consumido por el fuego (C_c), el factor de consumo (F), y las emisiones (E) (IPCC, 2001), en cada sitio de muestreo, involucró los modelos:

$$C_c = C - C_r \quad (3)$$

$$F = C_c / C \quad (4)$$

$$E = S \text{ C } F \text{ Fe} \quad (5)$$

donde C =carga inicial de combustibles, C_r =carga residual de combustibles, S =superficie y Fe =factor de emisión.

Como Fe se tomó $1.703 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, referido por varios autores y citado por Urbanski (2013), para quemas prescritas en bosques de pino-encino del sureste de EUA.

Análisis estadístico

Las variables estudiadas se compararon entre tratamientos de quema a favor y en contra con la prueba de t de Student ($p \leq 0.05$), con prueba de desigualdad de varianzas. Asimismo, con el método

where they were placed in drying ovens at 70 °C and weighed until they reached constant weight. The dry weight of each sample was connected with the imaginary rectangular prism obtained in the field, product of the multiplication of coverage (as a proportion of one) by the average height or depth, depending on the type of fuel. Based on the resulting averages, the initial and residual loads of the prescribed burnings were estimated for the fuels sampled in the field. Finally, the loads were extrapolated to $t \text{ ha}^{-1}$.

The models used for woodfuels require information about their specific gravity. This information was gathered from samples of this type of fuel that were collected from the forest floor. According to Van Wagner (1968), Brown (1974), and Morfin *et al.* (2012), the models used to obtain the loads (C) of woody materials from 1 to 100 h TR (1) and for 1000 h TR (both sound and rotten) were:

$$C = (k \text{ GE DCP } f \text{ c}) / (N \text{ L}) \quad (1)$$

$$C = (k \text{ GE } \sum \text{DC } c) / (N \text{ L}) \quad (2)$$

where $k=1.234$, GE=specific gravity, DCP=quadratic mean diameter, f =frequency of intersections, c =factor for the slope of the sampling line, N =number of sampling lines, L =length of the sampling line, $\sum \text{DC}$ =summation of quadratic diameters.

Estimation of emissions

The calculation of the fuel load consumed by fire (C_c), the consumption factor (F), and the emissions (E) (IPCC, 2001), involved the following models in each sampling site:

$$C_c = C - C_r \quad (3)$$

$$F = C_c / C \quad (4)$$

$$E = S \text{ C } F \text{ Fe} \quad (5)$$

where C =initial fuel load, C_r =residual fuel load, S =surface, and Fe =emission factor.

$Fe=1.703 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, the same than for prescribed burns in pine-oak forests in southeastern USA, according to several authors and quoted by Urbanski (2013).

Statistical analysis

The variables studied were compared between heading and backing fire treatments, using the Student's t -test ($p \leq 0.05$), with a variance inequality test. Likewise, the graphic method was used to establish normality. If normality was lacking, the Wilcoxon

gráfico se estableció si había normalidad. En los casos en que no hubo normalidad se usó la prueba de Wilcoxon (su valor exacto). Para todos los análisis se usaron los procedimientos Proc ttest y Proc nPar1way del programa SAS (v. 9.4) para microcomputadoras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo atmosférico

Durante las quemas prescritas a favor de la pendiente y viento, las medias y su desviación estándar (entre paréntesis) de velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa medias, fueron iguales a 4.77 km h^{-1} (2.85), 27.4°C (5.61) y 60.2% (19.83), en tanto que durante las quemas en contra los promedios alcanzaron 3.97 km h^{-1} (2.69), 31.2°C (2.05) y 52% (29.36). Las pruebas de igualdad de varianzas tuvieron valores p iguales a: 0.8275, 0.0006 y 0.1543, para las variables referidas, por lo que solo la temperatura mostró desigualdad de varianzas. Solo esta última variable tuvo diferencias significativas entre ambos tratamientos ($p=0.027$), no así velocidad del viento ($p=0.445$), ni humedad relativa ($p=0.338$). Las tres variables atmosféricas consideradas mostraron falta de normalidad, por lo que se usó la p del valor exacto de la prueba de Wilcoxon que fue igual a 0.523, 0.169 y 0.406; es decir, ninguna variable mostró diferencias en sus medianas entre los tratamientos probados. Sin embargo, aunque no hubo diferencias en la velocidad del viento, en las quemas en contra, el viento corrió contra el fuego por lo que también se aplicó la prueba con valores negativos de velocidad del viento para esta variable. En este caso, la media y su desviación estándar fue -3.97 km h^{-1} (2.69), no hubo desigualdad de varianzas ($p=0.827$) y hubo diferencias significativas con la prueba de t ($p\leq 0.001$). No hubo normalidad y la prueba de Wilcoxon mostró diferencias entre medianas ($p\leq 0.001$). Las medias de los parámetros de tiempo atmosférico en ambos métodos de quema estuvieron bajo los límites que Wade y Lunsford (1989) establecen como prescripción adecuada (hasta $5\text{--}16 \text{ km h}^{-1}$ de velocidad del viento, $30\text{ a }55\%$ de humedad relativa). No así la temperatura ($18\text{--}27^\circ\text{C}$), aunque tales autores la refieren para zonas de clima templado frío o clima frío.

Comportamiento del fuego

La variable VP alcanzó una media y desviación estándar (entre paréntesis) igual a 3.63 m min^{-1} (3.41)

test (its exact value) was used. For all analyses, the Proc ttest and Proc nPar1way procedures of the SAS v. 9.4 statistical software for microcomputers were used.

RESULTS AND DISCUSSION

Weather

During the prescribed heading fires, the means and their standard deviation (in parentheses) of wind speed, temperature, and relative humidity were 4.77 km h^{-1} (2.85), 27.4°C (5.61), and 60.2% (19.83), respectively. Meanwhile, during the backing fires, the averages reached 3.97 km h^{-1} (2.69), 31.2°C (2.05), and 52% (29.36), respectively. In the case of the above-mentioned variables, the inequality of variances test had the following p -values: 0.8275, 0.0006, and 0.1543. As a result, only temperature showed inequality of variances. Only this last variable showed significant differences between both treatments ($p=0.027$); wind speed ($p=0.445$) and relative humidity ($p=0.338$) did not show significant differences. The three atmospheric variables under consideration lacked normality; therefore, the p of the exact value of the Wilcoxon test was used (0.523, 0.169, and 0.406). In other words, there were no differences between the medians of the variables of the applied treatments. However, although there were no differences in the wind speed, the wind blew against the fire in backing fires, so the test was also applied with negative wind speed values for this variable. In this case, the mean and its standard deviation was -3.97 km h^{-1} (2.69), there was no inequality of variances ($p=0.827$), and there were significant differences with the t -test ($p\leq 0.001$). There was no normality and the Wilcoxon test showed differences between medians ($p\leq 0.001$). In both burn methods, the means of the weather parameters were below the limits that Wade and Lunsford (1989) established as an adequate prescription (up to $5\text{--}16 \text{ km h}^{-1}$ wind speed, $30\text{ to }55\%$ relative humidity). That is not the case of temperature ($18\text{--}27^\circ\text{C}$), although the said authors mention that it recorded in cold temperate climate or temperate climate zones.

Fire behavior

In the heading fire, the VP variable reached a mean and standard deviation (in parentheses) equal

en la quema a favor, mientras que para la quema en contra fue 0.59 m min^{-1} (0.26). Hubo desigualdad de varianzas ($p \leq 0.001$) y diferencias significativas para esta variable con la prueba de t ($p = 0.028$). No hubo normalidad y con la prueba de Wilcoxon hubo diferencias entre medianas ($p = 0.003$). Por seguridad y problemas de accesibilidad no se obtuvieron mediciones de VP del incendio, pero se estimaron en $>30 \text{ m min}^{-1}$. La LL alcanzó 0.91 (0.28) y 0.72 m (0.30), para quemas a favor y en contra. Las varianzas fueron similares ($p = 0.837$) y no hubo diferencias entre los dos tratamientos ($p = 0.188$). Tampoco hubo normalidad en este caso, ni fue significativa la prueba de Wilcoxon ($p = 0.129$).

En el incendio, el LL alcanzó una media de 1.94 m (1.06). Hubo desigualdad de varianzas ($p = 0.016$) y la prueba de t no mostró diferencias ($p = 0.063$). Tampoco hubo normalidad y la prueba de Wilcoxon mostró diferencias significativas entre las medianas ($p = 0.033$).

Las cifras de tiempo atmosférico y de comportamiento del fuego corresponden con las de otras investigaciones. En encinares tropicales de *Q. magnoliifolia* en Guerrero, se realizaron quemas prescritas experimentales entre 25 a 28 °C, con humedades relativas de 33 hasta 25 %, velocidad del viento de 7 a 8 km h^{-1} y ráfagas de hasta 25 km h^{-1} . Las LL fueron de 0.5 a 3 m y se tuvo una relación logarítmica directa en la que la LL es función de la velocidad del viento (López *et al.*, 2015). Quemias prescritas en bosques de pino-encino de Chihuahua, con *Pinus duranguensis* Martínez y *Q. sideroxyla* A. J. A. Bonpland, realizadas con una humedad relativa en torno a 60 %, vientos de 2 a 6.1 km h^{-1} y temperaturas de 1.5 a 14.5 °C, mostraron LL de 1 hasta 6 m y VP de 0.8 hasta 5 m min^{-1} (Flores *et al.*, 2010).

Las mayores VP y LL a favor de viento y pendiente se conocen. El viento alimenta con oxígeno la combustión, tiende la columna convectiva y la llama y las acerca a los materiales no quemados, haciendo que se sequen y queden disponibles con más rapidez; además, genera pavesas. Conforme el fuego avanza, los combustibles hacia arriba de la pendiente son secados con más rapidez que los que están hacia abajo, porque la columna convectiva y la radiación les quedan más de cerca y el fuego en el frente es más intenso, lo que acelera la combustión y la VP (Scott *et al.*, 2014). Las pocas diferencias entre las quemias

to 3.63 m min^{-1} (3.41), while for the backing fire, it was 0.59 m min^{-1} (0.26). There was inequality of variances ($p \leq 0.001$) and significant differences for this variable with the t -test ($p = 0.028$). There was no normality, and —with the Wilcoxon test— there were differences between medians ($p = 0.003$). Due to safety and accessibility issues, no fire VP measurements were obtained, but they were estimated at $>30 \text{ m min}^{-1}$. LL reached 0.91 (0.28) and 0.72 m (0.30), in both heading and backing fires. The variances were similar ($p = 0.837$) and there were no differences between both treatments ($p = 0.188$). In this case, there was no normality and the Wilcoxon test produced no significant results ($p = 0.129$).

In the forest fire, LL reached a mean of 1.94 m (1.06). Variances were unequal ($p = 0.016$) and the t -test showed no differences ($p = 0.063$). There was no normality either and the Wilcoxon test showed significant differences between the medians ($p = 0.033$).

The figures for weather and fire behavior matched those of other researches. Experimental prescribed burns were carried out in a tropical oak woodland of *Q. magnoliifolia* in Guerrero. The weather had the following characteristics: temperature between 25 and 28 °C, with 33 to 25 % relative humidity, wind speed of 7 to 8 km h^{-1} , and gusts up to 25 km h^{-1} . LLs ranged from 0.5 to 3 m and there was a direct logarithmic relationship in which LL is a function of wind speed (López *et al.*, 2015). In pine-oak forests in Chihuahua where *Pinus duranguensis* Martínez and *Q. sideroxyla* A. J. A. Bonpland can be found, prescribed burns —carried out with a relative humidity around 60 %, winds of 2 to 6.1 km h^{-1} , and temperatures of 1.5 to 14.5 °C— showed LL of 1 to 6 m, and PV of 0.8 up to 5 m min^{-1} (Flores *et al.*, 2010).

The largest VP and LL in heading fires are known. The wind provides oxygen to the combustion, tilts the convective column and the flame, and brings them closer to the unburned materials, drying them and making them available quicker; in addition, it generates flying sparks. As the fire rages on, the fuels found uphill dry quicker than those found downhill, because they are closer to the convective column and the radiation and the fire in the front line is more intense; this situation accelerates the combustion and VP (Scott *et al.*, 2014). The few differences between the heading and backing fires are based on the fact that (for safety purposes) both were carried

a favor y en contra estriban en que, por seguridad, ambas se realizaron en condiciones de tiempo atmosférico moderado (Figura 4). Respecto a la topografía, Franklin *et al.* (1997) establecen que la pendiente es de particular relevancia para conferir intensidad al fuego en camas de combustible de hojarasca y capa de fermentación de encinares norteamericanos.

Cargas inicial y residual de combustibles forestales

En este caso se comparó a los dos tipos de quema en las variables carga parcial por cada tipo de combustible forestal, suma de combustibles leñosos y carga total. De la misma forma se compararon la carga residual, la carga consumida, la proporción de carga consumida y el factor de consumo. La mayoría de variables no tuvieron normalidad y, con la prueba de Wilcoxon, sólo hubo diferencia de medianas entre las quemaduras en contra y a favor para: carga residual de hojarasca, factor de consumo de hojarasca, carga inicial de zacates y consumo de zacates. Al comparar carga total, carga residual, carga total consumida y su factor de consumo, no hubo diferencias para ninguna de estas variables entre tipos de quema. Dicho análisis se muestra en el Cuadro 1 (hojarasca y capa de fermentación), Cuadro 2 (zacates, herbáceas dicotiledóneas, arbustos y regeneración), Cuadro 3 (materiales leñosos con TR 1, 10 y 100 h), Cuadro 4 (materiales leñosos firmes y podridos con TR 1000 h), Cuadro 5 (carga total de combustibles leñosos) y Cuadro 6 (carga total de combustibles forestales). Al comparar las variables carga total y residual, consumo y factor de consumo, entre incendio y quema a favor y luego entre incendio y quema en contra, tampoco se hallaron diferencias.

out under moderate weather conditions (Figure 4). Regarding the topography, Franklin *et al.* (1997) established that the slope is of particular importance for the intensity of the fire in leaf litter fuel beds and the fermentation layer of North American oak woodlands.

Initial and residual loads of forest fuels

In this case, the following variables were compared for the two types of burns: the partial loads for each type of forest fuel, the sum of woody fuels, and the total load. Likewise, the residual load, the load consumed, the proportion of load consumed, and the consumption factor were compared. Most of the variables showed a lack of normality. The Wilcoxon test showed that there were only differences in medians between the backing and the heading fires for the following elements: residual load of leaf litter, consumption factor of leaf litter, initial grass load, and grass consumption. Comparing total load, residual load, total consumed load, and their consumption factor, there were no differences between any of these variables for these types of burn. This analysis is shown in Table 1 (leaf litter and fermentation layer), Table 2 (grasses, forbs, shrubs, and regeneration), Table 3 (woody materials with TR 1, 10, and 100 h), Table 4 (sound and rotten woody materials with TR 1000 h), Table 5 (total load of woody fuels), and Table 6 (total load of forest fuels). No differences were found between forest fire and heading fires, and then between forest fire and backing fires, when comparing the following variables: total and residual load, consumption, and consumption factor.



Figura 4. A) Quema prescrita a favor de viento y pendiente y B) en contra.
Figure 4. Prescribed A) heading fire, and B) backing fire.

Cuadro 1. Cargas medias ($t\ ha^{-1}$) y resultados del análisis estadístico para hojarasca y capa de fermentación.
Table 1. Average loads ($t\ ha^{-1}$) and statistical analysis results for leaf litter and fermentation layer.

Var.	$\bar{X}_{qc}(\sigma)$	$\bar{X}_{qf}(\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
CH	2.6702 (2.1535)	4.8780 (2.3462)	no	0.8143	0.0540	sí	ns
CrH	0.0043 (0.0130)	0.1161 (0.2109)	sí	<0.0001	0.1510	no	0.0294*
CcH	2.6659 (2.1582)	4.7619 (2.3992)	no	0.7718	0.0691	sí	ns
FH	99.29 (2.13)	95.18 (11.55)	sí	<0.0001	0.3227	no	0.0430*
CCF	10.7007 (17.2742)	13.9840 (25.6416)	no	0.2847	0.7547	no	ns
CrCF	0.1202 (0.2795)	3.8706 (9.3175)	sí	<0.0001	0.2619	no	ns
CcCF	10.5865 (17.3202)	10.1134 (18.8131)	no	0.8208	0.9750	no	ns
FCF	92.27 (19.81)	92.36 (17.08)	no	0.8076	0.9932	no	no

$\bar{X}_{qc}$ =carga promedio, quema en contra, σ =desviación estándar, $\bar{X}_{qf}$ =carga promedio, quema a favor, Des. σ^2 =desigualdad de varianzas, p=valor de p para la anterior, p (t)=valor de p para la prueba de t, Nor.=normalidad, p (Wil.)=valor de p para la prueba de Wilcoxon, CH=carga inicial de hojarasca, CrH=carga residual de hojarasca, CcH=consumo de hojarasca, FH=factor de consumo de hojarasca, CCF=carga inicial de capa de fermentación, CrCF=carga residual de la capa de fermentación, CcCF=consumo de la capa de fermentación y FCF=factor de consumo de la capa de fermentación. ns=no significativa ($p>0.05$). $\bar{X}_{qc}$ =average load, backing fire; σ =standard deviation; $\bar{X}_{qf}$ =average load, heading fire; Des. σ^2 =inequality of variances; p=p-value for the previous element; p (t)=p-value for the t-test; Nor.=normality; p (Wil.)=p-value for the Wilcoxon test; CH=initial load of leaf litter; CrH=residual load of leaf litter; CcH=consumption of leaf litter; FH=consumption factor of leaf litter; CCF=initial load of fermentation layer; CrCF=residual load of fermentation layer; CcCF=consumption of the fermentation layer; and FCF=consumption factor of the fermentation layer. ns=not significant ($p>0.05$).

Cuadro 2. Cargas medias ($t\ ha^{-1}$) y resultados del análisis estadístico para combustibles superficiales vivos.
Table 2. Average loads ($t\ ha^{-1}$) and statistical analysis results for live surface fuels.

Var.	$\bar{X}_{qc}(\sigma)$	$\bar{X}_{qf}(\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
CZ	0.9397 (1.957)	0 (0) sí	sí	<0.001	0.188	no	0.009*
CrZ	0 (0)	0 (0)	-	-	-	-	-
CcZ	0.9737 (1.957)	0 (0) sí	sí	<0.001	0.188	no	0.009*
FZ	100 (0)	-	-	-	-	-	-
CD	0.440 (0.567)	0.089 (0.106)	sí	<0.001	0.103	no	ns
CrD	0 (0)	0 (0)	-	-	-	-	-
CcD	0.4405(0.567)	0.089 (0.106)	sí	<0.0001	0.103	no	ns
FD	100 (0)	100 (0)	-	-	-	-	-
CA	1.3658 (2.720)	1.1148 (2.902)	no	0.860	0.852	no	ns
CrA	0 (0)	0.5370 (1.719)	sí	<0.001	0.342	no	ns
CcA	1.3658 (2.720)	0.5417 (1.202)	sí	0.033	0.423	no	ns
FA	100 (0)	80.50 (33.78)	sí	<0.001	0.423	no	ns
CR	0.1375 (0.245)	0.2187 (0.445)	no	0.1125	0.638	no	ns
CrR	0 (0)	0.0117 (0.035)	sí	<0.0001	0.347	no	ns
CcR	0.1375 (0.245)	0.2070 (0.414)	no	0.161	0.671	no	ns
FR	100 (0)	98.35 (3.69)	sí	<0.0001	0.374	no	ns

CZ=carga inicial de zacates, CrZ=carga residual de zacates, CcZ=consumo de zacates, FZ=factor de consumo de zacates, CD=carga inicial de herbáceas dicotiledóneas, CrD=carga residual de herbáceas dicotiledóneas, CcD=consumo de herbáceas dicotiledóneas, FD=factor de consumo de herbáceas dicotiledóneas, CA=carga inicial de arbustos, CrA=carga residual de arbustos, CcA=consumo de arbustos, FA=factor de consumo de arbustos, CR=carga inicial de la regeneración, CrR=carga residual de la regeneración, CcR=consumo de la regeneración, FR=factor de consumo de la regeneración. $\diamond$ CZ=initial grass load; CrZ=residual grass load; CcZ=grass consumption; FZ=grass consumption factor; CD=initial forb load; CrD=residual forb load; CcD=forb consumption; FD=forb consumption factor; CA=initial shrub load; CrA=residual shrub load; CcA=shrub consumption; FA=shrub consumption factor; CR=initial regeneration load; CrR=residual regeneration load; CcR=regeneration consumption; FR=regeneration consumption factor.

Cuadro 3. Cargas medias (t ha^{-1}) y resultados del análisis estadístico para materiales leñosos delgados y medianos.
Table 3. Average loads (t ha^{-1}) and statistical analysis results for thin and medium woody materials.

Var.	$\bar{X}_{qc} (\sigma)$	$\bar{X}_{qf} (\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
C1	0.1181 (0.161)	0.3157 (0.278)	no	0.504	0.348	no	ns
Cr1	0.0183 (0.021)	0.059 (0.085)	no	0.119	0.468	sí	ns
Cc1	0.099 (0.140)	0.257 (0.199)	no	0.666	0.322	sí	ns
F1	80.59 (7.90)	85.51 (12.89)	no	0.795	0.326	sí	ns
C10	1.5202 (1.673)	3.0894 (2.007)	no	0.820	0.357	no	ns
Cr10	0.1163 (0.201)	0.8498 (0.337)	no	0.527	0.032	no	ns
Cc10	1.4039 (1.488)	2.2369 (1.816)	no	0.804	0.571	no	ns
F10	94.73 (7.45)	68.33 (16.07)	no	0.623	0.127	no	ns
C100	1.8034 (3.1236)	2.579 (4.467)	no	0.6569	0.817	no	ns
Cr100	0 (0)	0 (0)	-	-	-	-	-
Cc100	1.8034 (3.1236)	2.579 (4.467)	no	0.657	0.817	no	ns
F100	100 (-)	100 (-)	-	-	-	-	-

C1=carga inicial de materiales leñosos (1 h TR), Cr1=carga residual de materiales leñosos (1 h TR), Cc1=consumo de materiales leñosos (1 h TR), F1=factor de consumo de materiales leñosos (1 h TR), C10=carga inicial de materiales leñosos (10 h TR), Cr10=carga residual de materiales leñosos (10 h TR), Cc10=consumo de materiales leñosos (10 h TR), F10=factor de consumo de materiales leñosos (10 h TR), C100=carga inicial de materiales leñosos (100 h TR), Cr100=carga residual de materiales leñosos (100 h TR), Cc100=consumo de materiales leñosos (100 h TR), F100=factor de consumo de materiales leñosos (100 h TR). ❖ C1=initial load of woody materials (1 h TR); Cr1=residual load of woody materials (1 h TR); Cc1=consumption of woody materials (1 h TR); F1=consumption factor of woody materials (1 h TR); C10=initial load of woody materials (10 h TR); Cr10=residual load of woody materials (10 h TR); Cc10=consumption of woody materials (10 h TR); F10=consumption factor of woody materials (10 h TR); C100=initial load of woody materials (100 h TR); Cr100=residual load of woody materials (100 h TR); Cc100=consumption of woody materials (100 h TR); F100=consumption factor of woody materials (100 h TR).

Cuadro 4. Cargas medias (t ha^{-1}) y resultados del análisis estadístico para materiales leñosos gruesos (con 1000 h TR).
Table 4. Average loads (t ha^{-1}) and statistical analysis results for thick woody materials (with 1000 h TR).

Var.	$\bar{X}_{qc} (\sigma)$	$\bar{X}_{qf} (\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
C1000f	6.673 (6.089)	9.243 (16.01)	no	0.2527	0.808	no	ns
Cr1000f	1.988 (3.443)	0 (0)	sí	<0.001	0.423	no	ns
Cc1000f	4.68 (6.36)	9.24 (16.01)	no	0.273	0.670	no	ns
F1000f	63.16 (52.09)	100 (-)	-	-	-	-	-
C1000p	2.023 (3.505)	0 (0)	sí	<0.001	0.423	no	ns
Cr1000p	0 (0)	0 (0)	-	-	-	-	-
Cc1000p	2.023 (3.505)	0 (0)	sí	<0.001	0.423	no	ns
F1000p	100 (-)	-	-	-	-	-	-

C1000f=carga inicial de materiales firmes, Cr1000f=carga residual de materiales firmes, Cc1000f=consumo de materiales firmes, F1000f=factor de consumo de materiales firmes, C1000p=carga inicial de materiales podridos, Cr1000p=carga residual de materiales podridos, Cc1000p=consumo de materiales podridos, F1000p=factor de consumo de materiales podridos. ❖ C1000f=initial load of sound materials; Cr1000f=residual load of sound materials; Cc1000f=consumption of sound materials; F1000f=consumption factor of sound materials; C1000p=initial load of rotten materials; Cr1000p=residual load of rotten materials; Cc1000p=consumption of rotten materials; F1000p=consumption factor of rotten materials.

Cuadro 5. Cargas medias (t ha^{-1}) y resultados del análisis estadístico para la carga total de combustibles leñosos.
Table 5. Average loads (t ha^{-1}) and statistical analysis results for the total woodfuel load.

Var.	$\bar{X}_{qc} (\sigma)$	$\bar{X}_{qf} (\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
CLto	12.139 (5.261)	15.227 (22.30)	no	0.1054	0.827	no	ns
CrLto	2.122 (3.628)	0.9086 (0.255)	sí	0.0098	0.621	no	ns
CcLto	18.016 (2.713)	14.319 (22.138)	sí	0.0296	0.769	no	ns
FLto	87.73 (20.65)	75.69 (21.33)	no	0.9676	0.521	no	ns

CLto=carga inicial de combustibles leñosos, CrLto=carga residual de combustibles leñosos, CcLto=consumo de combustibles leñosos, FLto=factor de consumo de combustibles leñosos. ❖ CLto=initial woody fuel load; CrLto=residual woody fuel load; CcLto=woody fuel consumption; FLto=woody fuel consumption factor.

Cuadro 6. Cargas medias (t ha^{-1}) y resultados del análisis estadístico para la carga total de combustibles forestales.
Table 6. Average loads (t ha^{-1}) and statistical analysis results for the total load of forest fuels.

Var.	$\bar{X}_{qc} (\sigma)$	$\bar{X}_{qf} (\sigma)$	Des. σ^2	p	p (t)	Nor.	p (Wil.)
CCTo	28.393 (4.397)	35.512 (35.672)	sí	0.030	0.763	no	ns
CrCTo	2.247 (3.772)	5.48 (7.872)	no	0.373	0.556	no	ns
CcCTo	26.146 (4.215)	30.032 (28.120)	sí	0.044	0.834	no	ns
FCTo	92.68 (12.20)	87.49 (8.13)	no	0.615	0.573	no	ns

CCTo=carga inicial total de combustibles forestales, CrCTo=carga residual total de combustibles forestales, CcCTo=consumo de la carga total de combustibles forestales, FCTo=factor de consumo de la carga total de combustibles forestales. ❖ CCTo=total initial load of forest fuels; CrCTo=total residual load of forest fuels; CcCTo=consumption of the total load of forest fuels; FCTo=consumption factor of the total load of forest fuels.

En la zona del incendio, las cargas alcanzaron 32.647 t ha^{-1} (19.3049), su carga residual 1.0662 t ha^{-1} (0.9558), el consumo $31.5808 \text{ t ha}^{-1}$ (20.1262) y el factor de consumo 95.02 % (4.38). La carga es semejante a las 31.726 t ha^{-1} referidas por Bonilla *et al.* (2012), para masas templado-frías dominadas por *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. en Chignahuapan, Puebla, y por Alvarado *et al.* (2008), para encinares subtropicales del occidente de México, con especies como *Q. magnoliifolia* y *Q. resinosa* Liebm.

El consumo de los combustibles se relaciona con el comportamiento del fuego y con los efectos inmediatos y a largo plazo. La carga y el tipo de combustibles influyen en el nivel de consumo. Los pastos tienden a ser consumidos casi en su totalidad, pero en las camas con materiales orgánicos entran más en juego el contenido de humedad, la densidad y el contenido de minerales. En materiales leñosos, el diámetro está relacionado inversamente con su consumo (Scott *et al.*, 2014).

Los factores de consumo obtenidos en nuestro estudio, son consistentes con los de otras investigaciones en diferentes ecosistemas. Urbanski (2013) establece

In the fire area, the loads reached 32.647 t ha^{-1} (19.3049), residual loads reached 1.0662 t ha^{-1} (0.9558), consumption reached $31.5808 \text{ t ha}^{-1}$ (20.1262), and consumption factor reached 95.02 % (4.38). The load is similar to the 31.726 t ha^{-1} mentioned by Bonilla *et al.* (2012) for cold-temperate stands dominated by *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. in Chignahuapan, Puebla, and by Alvarado *et al.* (2008), for subtropical oak woodlands in western Mexico, where species such as *Q. magnoliifolia* and *Q. resinosa* Liebm can be found.

Fuel consumption is related to fire behavior and its immediate and long-term effects. The load and type of fuel influence the level of consumption. The grasses are almost entirely consumed; however, the humidity content, density, and mineral content come into play in organic materials beds. In woody materials, the diameter has an inverse ratio to its consumption (Scott *et al.*, 2014).

The consumption factors obtained in our study match those of other researches in different ecosystems. Urbanski (2013) determined 88.3 % factors for mixed-conifer forests after forest fires north

factores de 88.3 % para bosques mixtos de coníferas luego de incendios forestales al norte de la Montañas Rocallosas. Brose (2016) obtuvo una carga de 25.9 t ha^{-1} (con ésta dividida entre combustibles ligeros y pesados en partes iguales, aproximadamente) y de hasta 61.8 t ha^{-1} (la mayor parte como combustibles medianos y pesados), en bosques de encino sin tratar y bajo cortas silvícolas de protección. Según dicho autor, quemas prescritas intensas durante la temporada de crecimiento, eliminaron casi todos los materiales ligeros y la mitad de los medianos y pesados. En bosques de coníferas de la Sierra Nevada de EUA, con siete especies incluyendo *Q. kelloggii* Newb., la carga fue 123.1 t ha^{-1} , y el factor de consumo 65.7 %; el consumo por tipo de combustibles fue materiales leñosos podridos con 1000 h TR (86.6 %), capa de fermentación (84.8 %), hojarasca (63.4 %), y materiales leñosos firmes (41.6 %) (Kobziar *et al.*, 2006). En nuestro estudio, los combustibles leñosos pesados cubrieron una proporción menor de la carga total, tanto en quemas a favor como en contra (30.6 y 26 %) y sus factores de consumo alcanzaron 77 y 100 %; fueron más consumidos debido a su baja carga y dimensiones menores.

Emisiones

Para las quemas prescritas en contra y a favor se estimaron emisiones de 44.53 y $51.14 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, así como $53.78 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ en el incendio forestal. Como la emisión se obtiene multiplicando la carga total consumida por una constante, tampoco hay diferencias para las emisiones. Pero este análisis se realizó con respecto a combustibles superficiales y que, si bien la afectación de las copas por las quemas prescritas es pequeña, en el caso del incendio es severa (ver subtítulo de severidad). Es decir, hay un mayor consumo de combustibles forestales aéreos no incluidos en este estudio más que como afectación de copas y, por ende, más emisiones, por lo cual las de los incendios son mayores que las de las quemas. Wiedinmeyer y Hurteau (2010) anotan para el oeste de EUA que las quemas prescritas reducen de 18-25 % las emisiones por incendios debido a sus menores intensidad y factor de consumo, aunque se trata de otro tipo de ecosistemas.

Severidad

Los árboles de las parcelas estudiadas tuvieron alturas medias de 9 a 10.8 m y diámetros normales

of the Rocky Mountains. Brose (2016) obtained a load of 25.9 t ha^{-1} (divided approximately in equal parts between light and heavy fuels) and a load of up to 61.8 t ha^{-1} (mostly as medium and heavy fuels), in untreated oak forests that were subject to silvicultural cutting. According to the said author, intense prescribed burns during the growing season eliminated almost all light materials, and half of medium and heavy ones. In conifer forests of the Sierra Nevada mountain range, USA —home to seven species, including *Q. kelloggii* Newb.—, the load was 123.1 t ha^{-1} , the consumption factor was 65.7 %, and the consumption by type of fuel was rotten woody materials —with 1000 h TR (86.6 %), fermentation layer (84.8 %), leaf litter (63.4 %), and firm woody materials (41.6 %) (Kobziar *et al.*, 2006). In our study, the heavy woody fuels accounted for a smaller proportion of the total load, both in heading and backing fires (30.6 and 26 %), and their consumption factors reached 77 and 100 %. More heavy woodfuel was consumed as a result of its low load and smaller dimensions.

Emissions

For the backing and heading fires, 44.53 and $51.14 \text{ t ha}^{-1} \text{ CO}_2$ emissions were estimated, while the forest fire had a $53.78 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ value. Since the emission is obtained multiplying the total load consumed by a constant, emissions showed no differences. However, this analysis was focused on superficial fuels and, even though the crown was slightly affected by the prescribed burns, that was not the case at all when fires were involved (See: Severity). In other words, more aerial forest fuels are consumed than those included in this study, only were considered as affected crown; therefore, the emissions produced by fires are greater than those produced by prescribed burns. Wiedinmeyer and Hurteau (2010) point out that prescribed burns in western USA —although it is a different ecosystem— reduce fire emissions by 18-25 %, due to their lower intensity and consumption factor.

Severity

The trees of the studied plots had average heights of 9 to 10.8 m and diameter at breast height between

entre 18.3 y 20.8 cm. El CHC y la CT alcanzaron valores mayores en las quemas en contra, 26.8 % (35.7) y 1.17 m (1.03) ($P=0.0054$), que en las quemas a favor, 9.3 % (16.3) y 0.36 m (0.42) ($p\leq 0.0001$). Esto se debió al mayor tiempo de residencia del fuego (con similar longitud de llama) en las primeras. No obstante, los promedios de CHC no rebasaron $\frac{1}{3}$ de afectación y está establecido para pinos, que con un tercio de afectación de copas incluso se favorece el crecimiento en diámetro de los árboles, siempre que la temporada de lluvias siguiente no sea pobre. Esto obedece a que se elimina follaje de la parte baja de la copa, menos eficiente fotosintéticamente, a la eliminación de ramas bajas que demandan más fotosintatos de los que produce su follaje, y a la acción fertilizadora de las cenizas resultantes de la combustión, ricas en cationes (Ryan y Reinhardt, 1988; Rodríguez *et al.*, 2007). También la altura de afectación sobre el tronco es aceptable en ambos tratamientos. En el incendio, la afectación de copas fue casi total, 96.7 % (7.8), y la CT alcanzó 2.57 m (1.70), superó tanto en CHC a quemas en contra y a favor (en los dos casos $p\leq 0.0001$), como en la CT ($p=0.0172$ y $p=0.0009$). Ryan y Reinhardt (1988) establecen que tal nivel de afectación aumenta la probabilidad de mortalidad de coníferas norteamericanas. Pero Juárez *et al.* (2012) señalan que los encinos, como *Q. crassifolia*, aunque resulten con la copa 100 % quemada tienen una baja mortalidad y rebrotan. Esto último también se apreció en encinos juveniles (5 a 6 años de plantados) de *Q. lobata* Née, luego de quemas prescritas de primavera y de verano en California, las cuales implicaron baja mortalidad (3-4 %), si bien 66-72 % de los encinos resultaron con la parte aérea muerta pero también rebrotaron (Holmes *et al.*, 2011). En bosques tropicales de *Q. magnoliifolia* en Guerrero, durante quemas prescritas con LL de 0.5 a 3 m, hubo mayor severidad que en nuestro estudio, pues 40 % de las alturas de CT tuvieron entre 1 y 2 m, y 50 % de la frecuencia del CHC con 25 a 50 % de afectación (López *et al.*, 2015).

En masas de coníferas mixtas, con siete especies, una de ellas *Q. kelloggii*, en la Sierra Nevada, EUA, tal especie tuvo una supervivencia de 42.6 % ocho meses después de la aplicación de quemas prescritas. Los árboles vivos tuvieron mayor diámetro promedio (26.1 cm) que los muertos (7.6 cm) y alturas medias de 11.4 y 4.4 m, respectivamente. La máxima altura

18.3 and 20.8 cm. The CHC and CT reached higher values in backing fires —26.8 % (35.7) and 1.17 m (1.03) ($p=0.0054$)— than in heading fires —9.3 % (16.3) and 0.36 m (0.42) ($p\leq 0.0001$)—, because fire residence time was longer in the former case (with a similar flame length). However, averages CHC did not exceed $\frac{1}{3}$ of affectation. In the case of pines in which one third of their crowns are affected, fire even favors the diameter growth of the trees, provided that there is abundant rainfall during the next rainy season. This is caused by the elimination of foliage from the lower part of the crown —which is less photosynthetically efficient— and from the low branches —which demand more photosynthates than those produced by their foliage—, and the fertilization provided by the cation-rich ashes resulting from the combustion (Ryan and Reinhardt, 1988; Rodríguez *et al.*, 2007). The height of affectation on the trunk is also acceptable in both treatments. In the fire, 96.7 % (7.8) of the crown area was affected; meanwhile, CT reached 2.57 m (1.70), surpassing both backing and heading fires, in CHC (in both cases, $p\leq 0.0001$), as well as in CT ($p=0.0172$ and $p=0.0009$, respectively). Ryan and Reinhardt (1988) established that such level of affectation increases the mortality probability among North American conifers. However, Juárez *et al.* (2012) point out that oaks (including *Q. crassifolia*) have a low mortality and regrowth rate, even when their crown is completely burned. This was also the case of young oaks (5 to 6 years of planting) of *Q. lobata* Née, after spring and summer prescribed burns in California. A low mortality was implied (3-4 %), despite the death of 66-72 % of the aerial part of the oaks, although the trees resprouted (Holmes *et al.*, 2011). In the tropical forests of *Q. magnoliifolia* in Guerrero, prescribed burns with 0.5 to 3 m LL were more severe than in this study, because 40 % of CT heights reached between 1 and 2 m, and 50 % of the CHC frequency of CHC faced a 25 to 50% affectation (López *et al.*, 2015).

In Sierra Nevada, USA, eight months after the application of prescribed burns, *Q. kelloggii* (one of seven species found in the area) had a survival rate of 42.6 %. Live trees had a greater average diameter (26.1 cm) than dead trees (7.6 cm), while their average heights reached 11.4 and 4.4 m, respectively. In the same order, the maximum CT height reached 1.4 and 1.7 m (Kobziar *et al.*, 2006).

de la CT, en el mismo orden, alcanzó 1.4 y 1.7 m (Kobziar *et al.*, 2006).

La información generada en nuestro estudio aporta un modelo de combustibles para este tipo de vegetación en la región, y es de utilidad en la modelación de emisiones y de peligro de incendio forestal. Además, como guía para la realización de quemas prescritas en la zona, con fines como reducción de combustibles y abatimiento de emisiones de CO₂, en comparación con incendios forestales y, en general, como apoyo para el manejo integral del fuego.

Las quemas prescritas a favor, dentro de la prescripción aquí recomendada, tienen la ventaja de cubrir más terreno con mayor velocidad, así como la desventaja de requerir todavía más cuidados, pues es más fácil un escape durante quemas de este tipo, que durante una en contra.

Las quemas prescritas ayudan a reducir las emisiones de varias maneras. La primera es por las menores emisiones que implican por unidad de superficie, dadas sus menores intensidad y severidad. La segunda, a través de su efecto preventivo, pues si se acuerda una quema prescrita con un productor, puede evitarse un incendio forestal y tercero, las quemas prescritas tienden a tener una menor superficie que los incendios forestales. Todos estos factores reducen las emisiones de gases de invernadero y posicionan a las quemas prescritas como una herramienta con ese propósito, entre otros.

Conforme los resultados del presente experimento, las quemas prescritas tienen potencial para ser utilizadas en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero por incendios forestales en la zona de estudio. Debe contemplarse también, la multiplicidad de objetivos de manejo de la tierra adicionales, que se pueden alcanzar con esta herramienta.

CONCLUSIONES

En el área de estudio y bajo las condiciones de tiempo atmosférico analizadas, las quemas prescritas en contra o a favor de viento y pendiente, tuvieron la misma eficiencia para reducir los combustibles forestales y generan emisiones de CO₂ similares. Comparadas con el incendio forestal, las quemas prescritas mostraron menor intensidad y aunque no se hallaron diferencias en el consumo de combustibles forestales superficiales, la mayor severidad del fuego sobre los árboles evidencia mayor consumo en combustibles aéreos y con ello

The information generated in our study provides a fuel model for this type of vegetation in the region and is useful to model fire emissions and danger. In addition, it serves as a guide for prescribed burns in the area, with the following objectives: reducing fuels and CO₂ emissions, the latter in comparison to forest fires and, in general, supporting the integral fire management.

Within the prescription hereby recommended, prescribed fires using heading fire have the advantage of covering more ground with greater speed, as although they have the disadvantage of requiring even more care, since it is easier for burns of this type to escape, than during backing fires.

There are several ways in which prescribed burns help to reduce emissions. The first, because they involve lower emission per unit area, given their lower intensity and severity. The second, because they have a preventive effect: if a prescribed burn is agreed with a producer, a forest fire can be avoided. And the third, because prescribed burns have smaller area than forest fires. All these factors reduce greenhouse gas emissions. Therefore, prescribed burns are a useful tool for that and other purposes.

According to the results of the present experiment, prescribed burns can potentially be used to reduce the greenhouse gas emissions caused by forest fires in the study area. The multiplicity of additional land management objectives that can be achieved with this tool should be also considered.

CONCLUSIONS

In the study area and under the weather conditions analyzed, the backing and heading fires reduced forest fuels with the same efficiency and generated similar CO₂ emissions. Prescribed burns were less intense than the forest fire. Although no differences were found in the consumption of superficial forest fuels —between the forest fire and prescribed burns—, in the case of the former, trees were more severely affected by fire, showing a higher consumption of aerial fuels and, consequently, a higher level of greenhouse gas emissions. The level to which the trees in the prescribed burn treatments were affected does not jeopardize their survival, but the same cannot be concluded about the area affected by the forest fire. The information generated in this study is useful for fire management purposes in the region, since it provides: a forest fuel model; fire behavior

una mayor emisión de gases de efecto invernadero. El nivel de afectación del arbolado en los tratamientos de quemas prescritas no compromete su supervivencia, pero no se puede concluir lo mismo del área afectada por incendio forestal. La información generada en el presente estudio es útil para el manejo del fuego en la región, pues proporciona: modelo de combustibles forestales, información sobre comportamiento del fuego, datos para normas de prescripción en quemas prescritas, consumo de combustibles, estimaciones de emisiones de CO₂ y de severidad en el arbolado.

AGRADECIMIENTOS

A: la comunidad de Villahermosa, sus brigadas comunitarias de prevención y combate de incendios y de medición, Ayuntamiento de Villaflores, J. Domingo Cruz López, UACH, UNACH, UNICACH, FMCN, USDA FS, US AID, Biomasa, A. C., Conafor y Conanp.

LITERATURA CITADA

Alvarado C., E., J. E. Morfin R., E. J. Jardel P., R. E. Vihnanek, D. W. Wright, J. M. Michel F., C. S. Wright, R. D. Ottmar, D. V. Sandberg, y A. Nájera D. 2008. Fotoseries para la Cuantificación de Combustibles Forestales de México: Bosques Montanos Subtropicales de la Sierra Madre del Sur y Bosques Templados y Matorral Submontano del Norte de la Sierra Madre Oriental. Pacific Wildland Fire Sciences Laboratory Special Publication no. 1. Seattle, Washington. University of Washington, College of Forest Resources. 98 p.

Bonilla P., E., D. A. Rodríguez T., A. Borja de la R., C. Cántora G., y J. Santillán P. 2012. Dinámica de combustibles en rodales de encino-pino de Chignahuapan, Puebla. Rev. Mex. Cie. For. 4: 20-33.

Brose, P. H. 2016. Consumption and reaccumulation of forest fuels in oak shelterwood stands managed with prescribed fire. In: Schweitzer, C. J., W. K. Clatterbuck, and C. M. Oswalt (eds). 18th Biennial Southern Silvicultural Research Conference. 2-5 March, 2015, Knoxville, Tennessee. General Technical Report. Southern Research Station, USDA Forest Service, Southern Research Station SRS-212. Asheville. pp. 191-197.

Brown, J. K. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. General Technical Report INT-16. USDA Forest Service, Intermountain Forest Research Station. Ogden, Utah. 24 p.

Cochrane, M. A. (ed). 2009. Tropical Fire Ecology. Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics. Springer, Praxis. Chichester. 645 p.

Dickinson, M. B., T. F. Hutchinson, M. Dietenberger, F. Matt, and M. P. Peters. 2016. Litter species composition and topographic effects on fuels and modeled fire behavior in an oak-hickory forest in the Eastern USA. PLoS ONE 11: 1-30.

Ecosur (El Colegio de la Frontera Sur). 2018. (<http://www.ecosur.mx/sitios/analisis-geografico/galeria/mapas-peot> (Consulta: febrero 2018).

information; data for prescribed burn prescriptions, fuel consumption; and estimations of CO₂ emissions; and the degree of severity in the trees.

—End of the English version—



Flores G., J. G., J. Xelhuantzi C., y Á. A. Chávez D. 2010. Monitoreo del comportamiento del fuego en una quema controlada en un rodal de pino-encino. Rev. Chapingo Ser. Cie. For. Amb. 16: 45-59.

Franklin, S. B., P. A. Robertson, and J. S. Fralish. 1997. Small-scale fire temperature patterns in upland *Quercus* communities. J. Appl. Ecology 34: 613-630.

Hassan, R. R., and N. Ash (eds). 2005. Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: Current State and Trends. Vol. 1. University of Pretoria Council for Science and Industrial Research UNEP World Conservation South Africa, South Africa Monitoring Centre, United Kingdom. Island Press. Washington, D. C.

Holmes, K. A., K. E. Veblen, A. M. Berry, and T. P. Young. 2011. Effects of prescribed fires on young oak valley oak trees at a research restoration site in the central Valley of California. Rest. Ecol. 19: 118-125.

IPCC (Intergovernmental Panel of Climatic Change). 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. Cambridge, U. K. 1042 p.

Juárez B., J. E., Rodríguez T., D. A., and Myers, R. L. 2012. Fire tolerance of trees in oak-pine forest at Chignahuapan, Puebla, Mexico. Int. J. Wildland Fire 21: 873-881.

Kobziar, L., J. Moghaddas, and S. L. Stephens. 2006. Tree mortality patterns following prescribed fires in a mixed conifer forest. Can. J. For. Res. 36: 3222-3238.

López M., M. Á., D. A. Rodríguez T., F. Santiago C., V. A. Sereno Ch., y D. Granados S. 2015. Tolerancia al fuego en *Quercus magnoliifolia*. Rev. Árvore 39: 523-533.

Morfin R., J. E., E. Jardel P., y J. M. Michel F. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. U. de G., FMCN, U. de W., USDA FS, US AID, Conafor. México. 95 p.

Popkin, G. 2017. Massive El Niño sent greenhouse-gas emissions soaring. Nature 548: 269.

Rodríguez T., D. A., U. B. Castro S., M. Zepeda B., and R. J. Carr. 2007. First year survival of *Pinus hartwegii* following prescribed burns at different intensities and different seasons in central Mexico. Int. J. Wildland Fire 16: 54-62.

Rodríguez T., D. A. 2014. Incendios de Vegetación. Su Ecología, Manejo e Historia. Ed. C. P., C. P., UACH, Semarnat, PPCIF, PNPI, Conafor, Conanp. México. 891 p.

Rodríguez T., D. A., and R. L. Myers. 2010. Using oak characteristics to guide fire regime restoration in Mexican pine-oak and oak forests. Ecol. Rest. 28: 304-323.

Ryan, K. C. 2000. Global change and wildland fire. In: Brown, J. K., and Smith, J. K. (eds). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. Gen. Tech. Rep. RMRS-42. Vol. 2. Ogden, UT. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. pp: 175-183.

- Ryan, K. C., and E. D. Reinhardt. 1988. Predicting post-fire mortality of seven western conifers in forest fires. *Can. J. For. Res.* 3: 373-378.
- Scott, A. C., D. M. J. S. Bowman, W. J. bond, S. J. Pyne, and M. E. Alexander. 2014. *Fire on Earth. An Introduction*. Wiley Blackwell. Singapore. 413 p.
- Shlisky, A., J. Waugh, P. González, M. González, M. Manta, h. Santoso, E. Alvarado, A. Ainuddin Nuruddin, D. A. Rodríguez T., R. Swaty, D. Schmidt, M. Kauffmann, R. L. Myers, A. Alencar, F. Kearns, D. Johnson, J. Smith, D. Zollner, and W. Fulks. 2007. *Fire, ecosystems and people: Threats and strategies for global biodiversity conservation*. GFI Technical Report 2007-2. The Nature Conservancy. Arlington, VA. 20 p.
- Urbanski, S. P. 2013. Combustion efficiency and emission factors for wildfire-season fires in mixed conifer forests of the northern Rocky Mountains, US. *Atmosph. Chem. Physics* 13: 7241-7262.
- van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen. 2010. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmosph. Chem. Physics* 10: 11707-11735.
- Van Wagner, C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *For. Sci.* 14: 20-26.
- Wade, D. D., and J. D. Lunsford. 1989. *A guide for prescribed fire in Southern forests*. USDA Forest Service, Southern Region. Technical Publication R8-TP 11. Atlanta, GA. 56 p.
- Whelan, R. J. 1997. *The Ecology of Fire*. Cambridge University Press. Cambridge. 346 p.
- Wiedinmeyer, C., and M. D. Hurteau. 2010. Prescribed fire as a means of reducing forest carbon emissions in the western United States. *Env. Sci. Tech.* 44: 1926-1932.
- Zavala Ch., F. 2002. *Encinos y Robles. Notas Fitogeográficas*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx. 44 p.
- Zavala Ch., F. 2007. *Guía de los Encinos de la Sierra de Tepotzotlán, México*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México. 89 p.