

## Relationship between fuel and solar radiation in a *Pinus hartwegii* Lindl. forest and a grassland at the Iztaccihuatl-Popocatepetl Park

## Relación entre variables de combustibles y radiación solar en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. y un zacatonal en el Parque Iztaccihuatl-Popocatepetl

Dante A. Rodríguez-Trejo

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, km 38.5 carretera México-Texcoco, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México, México. e-mail: dantearuro@yahoo.com; tel.: +52 595 952 1500 ext. 5950.

### Abstract

**Introduction.** Fuel studies provide information on fire danger, fire behavior, greenhouse gas emissions, and fuel management.

**Objective.** To establish relationships between fuel variables, leaf area index, and solar radiation to estimate fuel loads in a *Pinus hartwegii* Lindl. forest and subalpine grassland at the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park.

**Materials and methods.** Fuels (load, cover, height, or depth), forest stand (tree measurement variables), and solar radiation (diffuse, direct, total area and clearing) were sampled. Relationships between variables were determined using linear regression using the coefficient of determination, significance, normality, homoscedasticity, multicollinearity, and autocorrelation.

**Results and discussion.** In the forest, the average load was 27.9 Mg·ha<sup>-1</sup>, with nearly 60 % of leaf litter and fermentation layer. There are direct relationships between grass cover and clearing; woody material load and leaf area index; and total fuel load with leaf litter depth and fermentation layer. Conditions with higher radiation promote greater grass load, while low radiation facilitates the accumulation of woody materials, leaf litter, and the fermentation layer. In the grassland, the load reached 6.8 Mg·ha<sup>-1</sup>, and there was a direct relationship between total fuel load and cover.

**Conclusions.** In the *P. hartwegii* forest and grassland, statistical models were found that relate forest fuel loads with radiation variables or with variables specific to the fuels, which expedites estimates and supports decisions for fuel management.

**Keywords:** fuel load; leaf litter; leaf area index; woody materials; grasses.

### Resumen

**Introducción.** Los estudios de combustibles brindan información sobre peligro de incendio, comportamiento del fuego, emisiones de gases de invernadero y manejo de combustibles.

**Objetivo.** Establecer relaciones entre variables de combustibles, índice de área foliar y radiación solar que permitan estimar cargas de combustibles en una masa de *Pinus hartwegii* Lindl. y un zacatonal subalpino en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.

**Materiales y métodos.** Se muestrearon combustibles (carga, cobertura, altura o profundidad), arbolado (variables dasométricas) y radiación solar (difusa, directa, total y fracción de cielo visible). Las relaciones entre variables se establecieron con regresión lineal, considerando coeficiente de determinación, significancia, normalidad, homocedasticidad, multicolinealidad y autocorrelación.

**Resultados y discusión:** En el bosque, la carga media fue de 27.9 Mg·ha<sup>-1</sup> con casi 60 % de hojarasca y capa de fermentación. Existen relaciones directas entre cobertura de zacates y fracción de cielo visible; carga de materiales leñosos e índice de área foliar; y carga total de combustibles con la profundidad de la capa de hojarasca y fermentación. Condiciones con más radiación propician mayor carga de zacates, mientras que la radiación baja facilita acumulación de materiales leñosos y hojarasca y capa de fermentación. En el zacatonal, la carga alcanzó 6.8 Mg·ha<sup>-1</sup> y hubo relación directa entre su carga total y cobertura.

**Conclusiones.** En el bosque de *P. hartwegii* y en el zacatonal se obtuvieron modelos estadísticos que relacionan cargas de combustibles forestales con variables de radiación o con variables propias de los combustibles, lo cual agiliza estimaciones y sustenta decisiones para el manejo de estos.

**Palabras clave:** carga de combustibles; hojarasca; índice de área foliar; materiales leñosos; zacates.

## Introduction

In Mexico, the forests of *Pinus hartwegii* Lindl. are those that develop at the highest elevations, between 2 900 and 4 000 m, although isolated individuals have been recorded at 4 300 m (Rzedowski, 2010); therefore, the species is considered subalpine. These forests form relatively low stands (5 to 20 m in height) that are moderately to sparsely dense, often pure or nearly pure (Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014; Rzedowski, 2010). At the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park (PNIP), this forest forms stands of 15 to 20 m in height, which are reduced to 5 or 8 m in the highest altitude areas, around 4 000 m. The species *P. hartwegii* tolerates low temperatures and frequent snowfall and is associated with dense grasslands and herbaceous plants such as *Lupinus* spp. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2013; Rzedowski, 2010). In Mexico, *P. hartwegii* is one of the species most adapted to fire, because it regenerates on ash beds, cespitose condition, thick bark, basal sprouts, and recovers foliage in the non-lethal charred area of the canopy (Rodríguez-Trejo, 2014).

The subalpine grassland region of the Valley of Mexico consists of tufted grasses, measure 60 to 120 cm in height and are found at altitudes of 3 000 to 4 300 meters. Below 4 000 m, such grasslands are secondary, derived from the destruction of pine forests, and above 4 000 m there are climax communities. Fire is a determining ecological factor in the existence, dynamics and exploitation of these species (Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014; Rzedowski, 2010). In low-elevation communities with lower fire frequency, succession advances to *P. hartwegii* forest and the burning of grasses for livestock to take advantage of their resprouts is a cause of forest fire (Rodríguez-Trejo, 2014). In the PNIP, this community is established between 3 700 to 4 350 m. Its dominant species, in different associations, are *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud., *Festuca hephaestophila* Nees, *F. livida* Willd. ex Spreng., *F. tolucensis* Kunth, *Muhlenbergia macroura* Hitchc. and *M. quadridentata* Trin. (CONANP, 2013; Rzedowski, 2010).

Studies on forest fuels are important for fire management, because they provide information for estimating forest fire hazards, modeling fire behavior, conducting prescribed burns, managing forest fuels, wildlife and forest pests, as well as estimates of carbon storage, forest ecosystem productivity, and emissions of pollutants and greenhouse gases (Flores-Garnica et al., 2018; Rodríguez-Trejo, 2014; Scott et al., 2014). The above is particularly relevant in high-altitude ecosystems, given their sensitivity to global warming.

The high variability of fuel loads within the same forest has become evident. Chávez-Durán et al.

## Introducción

En México, los bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. son los que se desarrollan a mayor elevación, entre 2 900 y 4 000 m, aunque se han registrado individuos aislados a 4 300 m (Rzedowski, 2010); por ello, la especie se considera subalpina. Estos bosques forman masas relativamente bajas (5 a 20 m de altura) y medianamente a poco densas, con frecuencia puras o casi puras (Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014; Rzedowski, 2010). En el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP), este bosque forma masas de 15 a 20 m de altura que se reducen a 5 u 8 m en las zonas de mayor altitud, en torno a los 4 000 m. La especie *P. hartwegii* tolera temperaturas bajas y nevadas frecuentes y se asocia con zacatonal denso y herbáceas como *Lupinus* spp. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2013; Rzedowski, 2010). En México, *P. hartwegii* es una de las especies más adaptadas al fuego, pues se regenera sobre lechos de ceniza, tiene estado cespitoso, corteza gruesa, cuenta con rebrotes basales y recupera follaje en la zona de chamuscado no letal de la copa (Rodríguez-Trejo, 2014).

Los zacatonales subalpinos del Valle de México constan de gramíneas amacolladas, miden de 60 a 120 cm de altura y se encuentran en altitudes de 3 000 a 4 300 m. Bajo la cota de 4 000 m, tales pastizales son secundarios, derivados de la destrucción de pinares y sobre dicha cota hay comunidades clímax. El fuego es un factor ecológico determinante en la existencia, dinámica y aprovechamiento de estas (Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014; Rzedowski, 2010). En las comunidades de altitud baja con menor frecuencia de incendios, la sucesión avanza a bosque de *P. hartwegii* y la quema de pastos para que el ganado aproveche sus rebrotes es una causa de incendio forestal (Rodríguez-Trejo, 2014). En el PNIP, esta comunidad se establece entre 3 700 a 4 350 m. Sus especies dominantes, en diferentes asociaciones, son *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud., *Festuca hephaestophila* Nees, *F. livida* Willd. ex Spreng., *F. tolucensis* Kunth, *Muhlenbergia macroura* Hitchc. y *M. quadridentata* Trin. (CONANP, 2013; Rzedowski, 2010).

Los estudios sobre combustibles forestales son importantes para el manejo del fuego, pues proveen información para la estimación de los peligros de incendio forestal, modelación de su comportamiento, conducción de quemas prescritas, manejo de combustibles forestales, fauna silvestre y plagas forestales, así como estimaciones de almacenamiento de carbono, productividad de ecosistemas forestales y emisiones de contaminantes y gases de invernadero (Flores-Garnica et al., 2018; Rodríguez-Trejo, 2014; Scott et al., 2014). Lo anterior reviste particular relevancia en ecosistemas de gran altitud, dada su sensibilidad al calentamiento global.

(2021) documented this in one-hectare of a pine-oak forest in the Sierra de Quila Natural Protected Area, Jalisco, with an average of 56.84 Mg·ha<sup>-1</sup> and a variation of 116.61 Mg·ha<sup>-1</sup> over a distance of just 72.11 m. Fieldwork for fuel sampling demands time and human and financial resources; however, few efforts have been made to study variables related to the fuels themselves and environmental factors (e.g., solar radiation) that would allow for simple and quick estimation of fuel loads and other variables. A study of this nature was conducted in the Sierra Norte of Puebla, in a forest of *Quercus crassifolia* Bonpl., where Rodríguez-Trejo et al. (2021) report that the total fuel load had a significant positive relationship with tree density and basal area; likewise, the understory fuel load (grasses, dicotyledonous herbaceous plants, and shrubs) showed a significant positive relationship with a clearing.

The objective of this study was to establish possible relationships between surface fuel variables (load, cover, height or depth), leaf area index and solar radiation (diffuse, direct, total, clearing) that allow estimating partial (woody materials) and total fuel loads. The study was conducted in a stand of *P. hartwegii* and in a subalpine grassland at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park.

## Materials and Methods

### Study area

The PNIP is in the northeastern part of the Transversal Volcanic Axis and is part of the Sierra Nevada. The park covers 39 819 ha, mainly in Estado de México, but also in Puebla and Morelos. With rugged topography, the PNIP is located at elevations between 3000 and 5480 m. The rocks are mainly basalts and andesites. In the area near the highest elevations, where this study was conducted, Andosol soils are predominant. The climates vary from temperate-humid to cold and very cold, with rainy season mainly in the summer. For example, in Hueyatenco it is semi-humid with rainfall in summer (annual averages: 7.7 °C and 1 186 mm), cold (between -2.5 and 5 °C) and very cold (<-2 °C) (CONANP, 2013). The park has several vegetation types, two of which were used for this study. For this purpose, an area was selected between the base of the Iztaccíhuatl volcano and the location known as 'Paso de Cortés' (Table 1; Figure 1).

### Field study

Field study included the survey of 14 composite sampling sites, seven in *P. hartwegii* forest and seven

La gran variabilidad de las cargas de combustibles forestales en un mismo bosque se ha hecho patente. Chávez-Durán et al. (2021) la documentaron en una hectárea de un bosque de pino-encino, en el Área Natural Protegida Sierra de Quila, Jalisco, con una media de 56.84 Mg·ha<sup>-1</sup> y variación de 116.61 Mg·ha<sup>-1</sup> en una distancia de solo 72.11 m. Los trabajos de campo para el muestreo de combustibles toman tiempo y recursos humanos y financieros; no obstante, se han hecho pocos esfuerzos por el estudio de variables tanto de los propios combustibles forestales como del ambiente (v. g. la radiación solar) que permitan la estimación sencilla y rápida de la carga de combustibles forestales y otras variables. Un estudio de esta naturaleza se hizo en la Sierra Norte de Puebla, en un bosque de *Quercus crassifolia* Bonpl., donde Rodríguez-Trejo et al. (2021) refieren que la carga total de combustibles tuvo relación positiva significativa con la densidad de árboles y el área basal; asimismo, la carga del sotobosque (zacates, herbáceas dicotiledóneas y arbustivas) mostró relación positiva significativa con la fracción de cielo visible.

El objetivo del presente estudio fue establecer posibles relaciones entre variables de combustibles superficiales (carga, cobertura, altura o profundidad), índice de área foliar y radiación solar (difusa, directa, total, fracción de cielo visible) que permitan estimar cargas parciales (materiales leñosos) y totales de los combustibles. El estudio se hizo en una masa de *P. hartwegii* y en un zacatonal subalpino del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El PNIP se enclava en la zona noreste del Eje Volcánico Transversal y forma parte de la Sierra Nevada. El parque cubre 39 819 ha, principalmente del Estado de México, pero también de Puebla y Morelos. Con topografía accidentada, el PNIP se sitúa a elevaciones entre 3000 a 5480 m. Las rocas son basaltos y andesitas, principalmente. En la región adyacente a las mayores altitudes, donde se realizó el presente estudio, prevalecen los suelos Andosoles. Los climas van de templado-húmedo a frío y muy frío, y el periodo de lluvias se presenta en verano, principalmente. Por ejemplo, en Hueyatenco es semifrío húmedo con lluvias en verano (medias anuales: 7.7 °C y 1 186 mm), frío (entre -2.5 y 5 °C) y muy frío (<-2 °C) (CONANP, 2013). El parque cuenta con diversos tipos de vegetación, en dos de los cuales se realizó el presente estudio. Para ello se eligió una zona ubicada entre el pie del volcán Iztaccíhuatl y el paraje conocido como 'Paso de Cortés' (Cuadro 1; Figura 1).

Table 1. Sampling sites at the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park

Cuadro 1. Sitios de muestreo en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.

Site/ Sitio	Coordinates/Coordenadas		Elevation (m)/ Elevación (m)	Slope (%)/ Pendiente (%)	Exposure/ Exposición
	Latitude/Latitud	Longitude/Longitud			
<i>P. hartwegii</i> forest/Bosque de <i>P. hartwegii</i>					
1	19.10° N	98.63° O	3573	19	South/Sur
2	19.10° N	98.64° O	3555	15	South-southwest/Sursudoeste
3	19.10° N	98.64° O	3572	8	South/Sur
4	19.10° N	98.64° O	3581	5	South/Sur
5	19.13° N	98.65° O	3778	55	West/Oeste
6	19.11° N	98.64° O	3674	47	North-northeast/Estenordeste
7	19.11° N	98.65° O	3676	25	East/Este
Subalpine grassland/Zacatonal subalpino					
1	19.123° N	98.652° O	3786	13	Northeast/Noreste
2	19.123° N	98.652° O	3786	13	Northeast/Noreste
3	19.125° N	98.650° O	3781	15	Southeast/Sureste
4	19.125° N	98.650° O	3781	15	Southeast/Sureste
5	19.118° N	98.646° O	3728	24	North-northeast
6	19.118° N	98.646° O	3728	24	North-northeast/Nornoreste
7	19.118° N	98.646° O	3728	24	North-northeast/Nornoreste

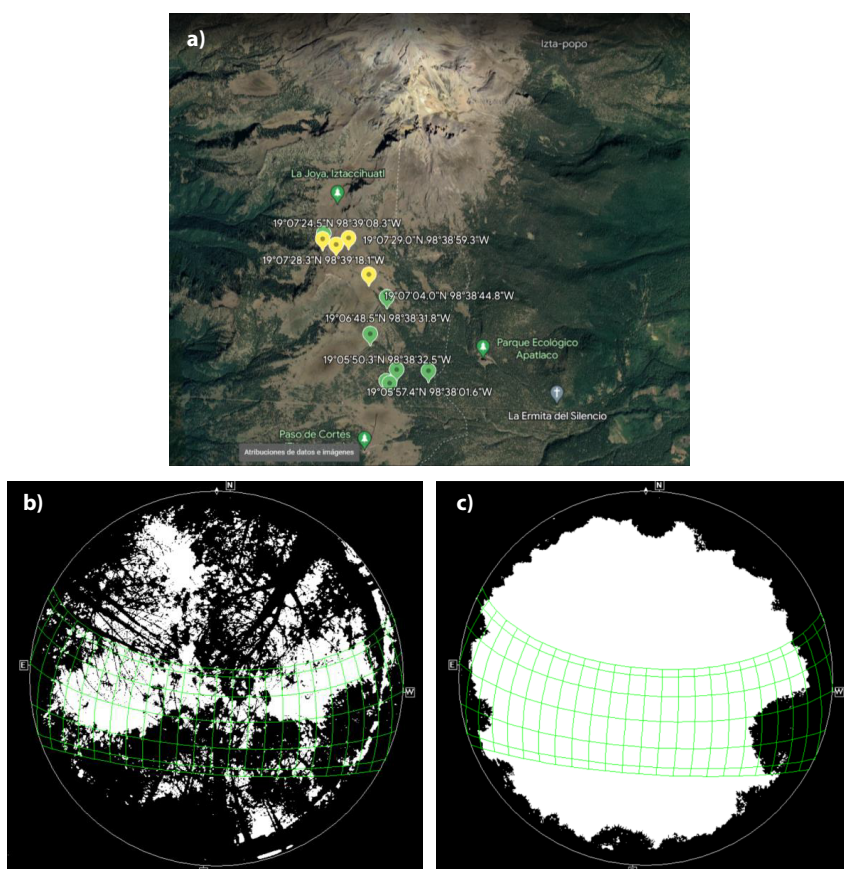


Figure 1. Sampling sites to the north of the Iztaccihuatl volcano summit. Google Earth® image (a). Contrast of the solar radiation environment between hemispherical photos of a forest (b) and an open area (c).

Figura 1. Sitios de muestreo al norte de la cumbre del volcán Iztaccihuatl. Imagen de Google Earth® (a). Contraste del ambiente de radiación solar entre las fotos hemisféricas de un bosque (b) y un claro (c).

in subalpine grassland. Each composite site included: surface fuels, trees, solar radiation environment and harvesting of fuels to obtain dry weight. These activities were carried out in May and early June 2021. Mean tree height with diameter at breast height (DBH) > 12.5 cm was 5.3 to 27.2 m and density from 50 to 1 100 individuals·ha<sup>-1</sup>.

Site data included: type of vegetation, date, site name, coordinates and altitude (Garmin GPS, model GPSMAP 66s), and exposure (Silva compass, model BK). Slope was measured with a Suunto clinometer (model Pm-5).

### Sampling of forest fuels

The following classes of forest fuels were sampled at each site, arranged in a triangular pattern with 12 m per side and randomly interlocked:

- 1) Leaf litter and fermentation layer (three 0.3 x 0.3 m CPVC -Chlorinated Polyvinyl Chloride- squares at the vertices of the triangles). Coverage (%) was estimated visually and three depths were measured with a steen ruler (cm) at the ends and center of an internal diagonal.
- 2) Grasses (three 1 x 1 m CPVC squares at the vertices of the triangles). Coverage was estimated visually (%) and three heights were measured with a stadia (m) at the ends and center of an internal diagonal.
- 3) Dicotyledonous herbaceous plants. Sampling conditions and measurements were the same as for grasses.
- 4) Woody materials. The Planar Intercept Method (Brown, 1974) and for this, lines marked with string and stakes were established starting from the origin of the sampling site (left side of the baseline, parallel to the contour line, facing the apex of the triangle) to record woody materials oriented east or west, alternately between sites. For materials with 1 to 100 hours of lag time (LT), the number of intersections per line was recorded (with a metal caliper), and for those with 1000 hours LT, both firm and decayed, the diameter (with a tape measure) was additionally measured at the point of intersection between the central axis of the woody material and the string. Surface materials and those between leaf litter and fermentation layers were included. One line of each length was used per sampling site. Line dimensions for LT class materials were: 1 h (diameter < 0.6 cm, 2 m line), 10 h (0.6 a 2.5 cm, 2 m), 100 h (2.6 a 7.5 cm, 4 m), 1 000 h firm (>7.5 cm, 12 m) and 1 000 h LT decayed (>7.5 cm, 12 m).

### Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en el levantamiento de 14 sitios de muestreo compuestos, siete en bosque de *P. hartwegii* y siete en zacatonal subalpino. Cada sitio compuesto incluyó: combustibles superficiales, arbolado, ambiente de radiación solar y cosecha de combustibles para obtención de su peso seco. Estas actividades se condujeron en mayo e inicios de junio de 2021. La altura media del arbolado con diámetro normal (DN) > 12.5 cm fue 5.3 a 27.2 m y la densidad de 50 a 1 100 individuos·ha<sup>-1</sup>.

Los datos del sitio incluyeron: tipo de vegetación, fecha, nombre del paraje, coordenadas y altitud (GPS Garmin, modelo GPSMAP 66s), así como exposición (brújula Silva, modelo BK). La pendiente se midió con clinómetro Suunto (modelo Pm-5).

### Muestreo de combustibles forestales

En cada sitio se muestrearon las siguientes clases de combustibles forestales, acomodados en un patrón triangular con 12 m por lado y enclavados al azar:

- 1) Hojarasca y capa de fermentación (tres cuadros de CPVC -Cloruro de polivinilo clorado- de 0.3 x 0.3 m en los vértices de los triángulos). La cobertura (%) se estimó visualmente y se midieron tres profundidades con regla metálica (cm) en los extremos y centro de una diagonal interna.
- 2) Zacates (tres cuadros de CPVC de 1 x 1 m en los vértices de los triángulos). La cobertura se estimó visualmente (%) y se midieron tres alturas con un estadal (m) en extremos y centro de una diagonal interna.
- 3) Herbáceas dicotiledóneas. Las condiciones de muestreo y las mediciones fueron las mismas que en los zacates.
- 4) Arbustos. Las condiciones de muestreo y las mediciones fueron las mismas que en los zacates.
- 5) Materiales leñosos. Se empleó el método de intersecciones planares (Brown, 1974) y para ello se fijaron, a partir del origen del sitio de muestreo (lado izquierdo de la línea base, paralela a la curva de nivel, viendo hacia la punta del triángulo), líneas marcadas con piola y estacas para el registro de los materiales leñosos con dirección este u oeste, alternadamente entre sitios. En materiales de 1 a 100 h de tiempo de retardo (TR) se registró el número de intersecciones por línea (con calibrador metálico) y para los de 1000 h TR, tanto firmes

### Tree sampling

At the origin of each composite site, three square sites for trees, coinciding at one vertex, with the following dimensions, were established:

- 1) 20 x 20 m for trees with DBH > 12.5 cm. Tree number, species, condition (alive or dead), DBH (diametric tape) and height (Suunto clinometer, m) were recorded.
- 2) 10 x 10 m for trees with DN < 12.5 cm, height > 1.3 m. Tree number, species, condition, DBH and height (with stadia, m) were recorded
- 3) 10 x 10 m for sapling (<1.3 m in height). Progressive number, condition (dead or alive), species and height (stadia, m) were recorded.

### Solar radiation and leaf area index

Between May and June 2021, a zenith photograph was taken at each of the seven composite sampling sites in the forest. The canopy was photographed from the ground with a digital camera and hemispherical lens (Delta T-Devices). The camera was placed on a leveling structure 95 cm above the ground to avoid including the canopy in the photographs. The images were processed with the Hemiview 2.1 SR4 program (Delta-T Company, 1998), which, from the coordinates, Julian day and altitude, calculates total, direct and diffuse solar radiation, and clearing and leaf area index (LAI). The latter is expressed in units of leaf area surface (one half of the leaf area divided by the surface of the crown area projection). Due to the lack of tree cover, the main factor determining solar radiation in the understory, no radiation data were obtained for the subalpine grassland.

### Fuel collection

At the fuel measurement sites, after data collection, grasses, dicotyledonous herbs, shrubs, leaf litter, and fermentation layer were harvested into labeled brown paper bags, which were then placed in plastic bags for transportation to the laboratory. For grasses, the lignified core of the tuft was not harvested, as it is generally not consumed in fires.

Additionally, the following woody materials were collected to determine their basic density: 27 with 1 hour of time-lag (LT), 33 with 10 hours LT, 20 with 100 hours LT, 5 with 1000 hours LT (firm), and 5 with 1,000 hours LT (decayed). These materials were labeled and placed in brown paper bags and plastic bags. The samples were dried in the laboratory at 90 °C (Ecoshel oven, model 9023A) until constant weight.

como podridos, se midió además el diámetro (con flexómetro) en el punto de intersección entre el eje central del material leñoso y la piola. Se incluyeron materiales superficiales y los que estuviesen entre las capas de hojarasca y fermentación. Se usó una línea de cada longitud por sitio de muestreo. Las dimensiones de línea para los materiales de las clases de TR fueron: 1 h (diámetro < 0.6 cm, línea de 2 m), 10 h (0.6 a 2.5 cm, 2 m), 100 h (2.6 a 7.5 cm, 4 m), 1000 h firmes (>7.5 cm, 12 m) y 1000 h TR podridos (>7.5 cm, 12 m).

### Muestreo de arbolado

En el origen de cada sitio compuesto se levantaron tres sitios cuadrados para arbolado, coincidentes en un vértice con las siguientes dimensiones:

- 1) 20 x 20 m para arbolado con DN > 12.5 cm. Se registró el número de árbol, especie, condición (vivo o muerto), DN (cinta diamétrica) y altura (clinómetro Suunto, m).
- 2) 10 x 10 m para árboles con DN < 12.5 cm, altura > 1.3 m. Se registró el número de árbol, especie, condición, DN y altura (con estadal, m).
- 3) 10 x 10 m para renuevo (<1.3 m de altura). Se registró número progresivo, condición (vivo o muerto), especie y altura (estadal, m).

### Radiación solar e índice de área foliar

Entre mayo y junio de 2021 se tomó una fotografía cenital en cada uno de los siete sitios de muestreo compuestos del bosque. El dosel se fotografió desde el piso con una cámara digital y lente hemisférica (Delta T-Devices). La cámara se colocó sobre una estructura niveladora a 95 cm del piso, para evitar incluir el zacatonal en las fotografías. Estas se procesaron con el programa Hemiview 2.1 SR4 (Delta-T Company, 1998) donde, a partir de las coordenadas, día juliano y altitud, calcula radiaciones solares total, directa y difusa, al igual que la fracción de cielo visible e índice de área foliar (IAF). Este último se expresa en unidades de superficie de área foliar (un medio del área foliar dividido por la superficie de la proyección del área de copa). Debido a la falta de cobertura arbórea, principal factor que determina la radiación solar en el sotobosque, no se obtuvieron datos de radiación para el zacatonal subalpino.

### Cosecha de combustibles

En los sitios de medición de combustibles, luego de la obtención de datos, se cosecharon zacates, herbáceas dicotiledóneas, arbustos, hojarasca y capa

## Data Analysis

For the statistical analysis, Pearson correlation coefficients ( $r$  squared equals the coefficient of determination of simple linear regression  $R^2$ ) and linear regression estimators were obtained with the PROC CORR and PROC REG programs, respectively, from the SAS v. 9.00<sup>®</sup> program (Statistical Analysis System Institute, Cary, NC, 2002). With the second procedure, the coefficients of determination ( $R^2$ ) and normal distribution of errors were determined using the Shapiro-Wilks test ( $p > 0.05$ ), homoscedasticity with the White test ( $p > 0.05$ ); variance inflation (no multicollinearity  $p > 0.05$ ), as well as the Durbin-Watson test. Given the sample size and the number of variables in regressions, low and high Durbin-Watson table values of 1.356 and 2.646, respectively, were used. If the calculated Durbin-Watson value was within this interval, there was no positive or negative correlation. Furthermore, a model of total fuel load explained by the depth of the leaf litter and fermentation layers was fitted, which was linearized exponentially, where the response variable was transformed, in this case total fuel load  $y_i$ :  $\ln(y_i) = B_0 + B_1 x_i$  where,  $\beta_0$  is the ordinate to the origin and  $\beta_1$  is the constant associated with the independent variable  $x_i$ . For a better interpretation of the model, we returned to the original scale of the (exponential, exp) expression:  $y_i = \exp(B_0 + B_1 x_i) + \varepsilon_i$ . The iterative Gauss-Newton method was used to find the parameter estimators. The graphs were obtained in the Excel program (Microsoft Office).

In the case of woody materials, before placing them in the drying oven, two diameters were measured perpendicularly at both ends, as well as their length, to obtain 'fresh' volume (Fv) with the cylinder formula:  $Fv = 0.7854 d^2 L$ ; where,  $d$  = average diameter (cm) and  $L$  = length of the woody material (cm). The basic density (BD,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) was calculated after obtaining the anhydrous weight (Po, g) of each oven sample, with the model:  $DB = Po / Vf$ . The model (Brown, 1974; Morfín-Ríos et al., 2012) was used to obtain the loading ( $C$ ,  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) of the woody materials at 1, 10 and 100 h LT:

$$C = (k * DB * QMD * f * c) / NL$$

where,

$k$  = constant equal to 1.234

QMD = quadratic mean diameter (cm)

$f$  = number of intersections with the sampling line

$c$  = slope correction factor: 1.00 for 0 and 10 % slope; 1.02, 20 %; 1.04, 30 %; 1.08, 40 %; 1.12, 50 %; 1.17, 60 %; 1.22, 70 %; 1.28, 80 %; 1.35, 90 %; 1.41, 100 %; 1.49, 110 %.

$N$  = number of lines surveyed

$L$  = length of the sampling line (as indicated in "Sampling of forest fuels").

de fermentación en bolsas de papel estraza etiquetadas que, a su vez, se colocaron en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio. En el caso de los zacates, no se cosechó el núcleo lignificado del macollo, pues generalmente este no se consume en los incendios.

También se recolectaron los siguientes materiales leñosos, para determinar su densidad básica: 27 con 1 h TR, 33 con 10 h TR, 20 con 100 h TR, 5 de 1000 h TR firmes y 5 de 1000 h TR podridos. Estos materiales se etiquetaron y colocaron en bolsas de papel estraza y bolsas de plástico. Las muestras se secaron en laboratorio a 90 °C (horno Ecoshel, modelo 9023A) hasta obtener peso constante.

## Análisis de datos

Para el análisis estadístico se obtuvieron coeficientes de correlación de Pearson ( $r$  que elevado al cuadrado iguala al coeficiente de determinación de la regresión lineal simple  $R^2$ ) y los estimadores de regresión lineal con los programas PROC CORR y PROC REG, respectivamente, del programa SAS v. 9.00<sup>®</sup> (Statistical Analysis System Institute, Cary, NC, 2002). Con el segundo procedimiento se determinaron los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de distribución normal de errores mediante la prueba de Shapiro-Wilks ( $p > 0.05$ ), homocedasticidad con la prueba de White ( $p > 0.05$ ); inflación de varianza (no multicolinealidad  $p > 0.05$ ), así como la prueba de Durbin-Watson. Dado el tamaño de la muestra y el número de variables en las regresiones, se utilizaron valores de la tabla de Durbin-Watson bajo y alto de 1.356 y 2.646, respectivamente. Si el valor de Durbin-Watson calculado quedaba dentro de dicho intervalo, no existía correlación positiva ni negativa. Asimismo, se ajustó un modelo de carga total explicado por la profundidad de las capas de hojarasca y de fermentación, el cual fue exponencial linealizado, donde se transformó la variable de respuesta, en este caso la carga total  $y_i$ :  $\ln(y_i) = B_0 + B_1 x_i$ ; donde,  $\beta_0$  es la ordenada al origen y  $\beta_1$  la constante asociada a la variable independiente  $x_i$ . Para una mejor interpretación del modelo, se regresó a la escala original de la expresión (exponencial, exp):  $y_i = \exp(B_0 + B_1 x_i) + \varepsilon_i$ . Se empleó el método iterativo de Gauss-Newton para encontrar los estimadores de los parámetros. Los gráficos se obtuvieron en el programa Excel (Microsoft Office).

En el caso de los materiales leñosos, antes de meterlos al horno de secado, se midieron dos diámetros perpendicularmente en ambos extremos, así como su longitud, para obtener volumen 'en fresco' (Vf) con la fórmula del cilindro:  $Vf = 0.7854 d^2 L$ ; donde,  $d$  = diámetro medio (cm) y  $L$  = longitud del material leñoso (cm). La densidad básica (DB,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) se calculó luego de obtener el peso anhidro (Po, g) de cada muestra en

In the case of woody materials with 1000 h LT, the model (Brown, 1974; Morfín-Ríos et al., 2012) was used:  $C = [k DB (\sum DC)] / NL$ ; where  $\sum DC$  = sum of squared diameters of woody materials.

## Results

### *Pinus hartwegii* forest

#### Tree measurements

The tree stand with DBH > 12.5 cm had means of DBH = 28 cm, height = 12.5 m, basal area = 14.1 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, and a density of 285.7 individuals·ha<sup>-1</sup>; these variables for the tree stand with DBH < 12.5 cm had, respectively, values of 9.4 cm, 3 m, 1.5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> and 300 individuals·ha<sup>-1</sup>. No regrowth was observed at the sampling sites. The overall averages in the previously mentioned order reached: 26 cm, 12.2 m, 14.6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> and 371.4 individuals·ha<sup>-1</sup> (Table 2). The range in dimensions indicates a variety of ages and densities.

#### Solar radiation

The clearing had an average of 0.3 (30 %), ranging from 0.1 to 0.7. The mean LAI reached 1.42 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>, with extremes ranging from 0.23 to 3.47 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. The average diffuse solar radiation was 493.3 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>, with extremes from 225.9 to 980.2 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>. The mean direct solar radiation reached 5285.3 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>, with extremes from 2711.2 to 9529.3 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>. Finally, the average total solar radiation had a value of 5778.7 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>, with extremes from 2938.4 to 10510.1 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup> (Table 3).

#### Forest fuel loads

The mean total fuel load was 27.9 Mg·ha<sup>-1</sup> in *P. hartwegii* forests. Leaf litter and fermentation layer accounted for almost 60 % of the load, followed by woody materials that covered almost a quarter (24 %), particularly those with 1 to 100 h LT (20 %). Grasses reached 18.3 % of the load, while herbaceous dicotyledons and shrubs were not representative (Table 4).

For the grass component, coverages ranged from 25 to 80 % (mean = 45 %), with heights from 28.3 to 81.7 cm (mean = 67.6 cm). The volume of the imaginary cube (product of coverage and height) ranged from 0.071 to 0.626 m<sup>3</sup> (mean = 0.324 m<sup>3</sup>). The grass load in the pine forest ranged from 1.018 to 8.417 Mg·ha<sup>-1</sup> (mean = 5.091 Mg·ha<sup>-1</sup>). No significant correlation was found between the grass load and the variables of height, coverage, or imaginary cube volume, nor with radiation variables or LAI in the *P. hartwegii* forest.

horno, con el modelo:  $DB = Po / Vf$ . Para la obtención de la carga ( $C$ , Mg·ha<sup>-1</sup>) de los materiales leñosos de 1, 10 y 100 h TR se utilizó el modelo (Brown, 1974; Morfín-Ríos et al., 2012):

$$C = (k * DB * QMD * f * c) / NL$$

donde,

k = constante igual a 1.234

DCP = diámetro cuadrático medio (cm)

f = número de intersecciones con la línea de muestreo

c = factor de corrección por pendiente: 1.00 para 0 y 10 % de pendiente; 1.02, 20 %; 1.04, 30 %; 1.08, 40 %; 1.12, 50 %; 1.17, 60 %; 1.22, 70 %; 1.28, 80 %; 1.35, 90 %; 1.41, 100 %; 1.49, 110 %.

N = número de líneas levantadas

L = longitud de la línea de muestreo (según se indicó en "Muestreo de combustibles forestales").

En el caso de materiales leñosos con 1000 h TR se usó el modelo (Brown, 1974; Morfín-Ríos et al., 2012):  $C = [k DB (\sum DC)] / NL$ ; donde  $\sum DC$  = sumatoria de los diámetros al cuadrado de los materiales leñosos.

## Resultados

### Bosque de *Pinus hartwegii*

#### Variables dasométricas

El arbolado con DN > 12.5 cm tuvo medias de DN = 28 cm, altura = 12.5 m, área basal = 14.1 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, así como una densidad de 285.7 individuos·ha<sup>-1</sup>; estas mismas variables para el arbolado con DN < 12.5 cm tuvieron, respectivamente, valores de 9.4 cm, 3 m, 1.5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> y 300 individuos·ha<sup>-1</sup>. No se observó renuevo en los sitios de muestreo. Los promedios generales en el orden ya referido alcanzaron: 26 cm, 12.2 m, 14.6 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> y 371.4 individuos·ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2). La gama en dimensiones indica variedad de edades y densidades.

#### Radiación solar

La fracción de cielo visible tuvo una media de 0.3 (30 %) con extremos de 0.1 a 0.7. El IAF medio alcanzó 1.42 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup> con extremos de 0.23 a 3.47 m<sup>2</sup>·m<sup>-2</sup>. La radiación solar difusa media fue de 493.3 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> y sus extremos de 225.9 a 980.2 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>. La media de la radiación solar directa alcanzó 5285.3 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> con extremos de 2711.2 y 9529.3 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>. Finalmente, la radiación solar total media tuvo un valor de 5778.7 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> con extremos de 2938.4 y 10510.1 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> (Cuadro 3).



Table 2. Tree measurements obtained from *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccihuatl-Popocatepetl National Park.  
Cuadro 2. Variables dasométricas obtenidas del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl.

Site/ Sitio	Tree stands DBH > 12.5 cm/ Arbolado DN > 12.5 cm				Tree stands DBH < 12.5 cm/ Arbolado DN < 12.5 cm				All trees/ Todos los árboles			
	DBH (cm) DN (cm)	Height (m) Altura (m)	BA (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) AB (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Density (Individuals·ha <sup>-1</sup> ) Densidad (Individuos·ha <sup>-1</sup> )	DBH (cm) DN (cm)	Height (m) Altura (m)	BA (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) AB (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Density (Individuals·ha <sup>-1</sup> ) Densidad (Individuos·ha <sup>-1</sup> )	DBH (cm) DN (cm)	Height (m) Altura (m)	BA (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ) AB (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Density (Individuals·ha <sup>-1</sup> ) Densidad (Individuos·ha <sup>-1</sup> )
1	46.3	27.2	34.16	200	0	0	0	0	46.3	27.2	34.17	200
2	14.7	6.8	5.94	225	0	0	0	0	14.7	6.8	5.94	225
3	30.6	12.9	15.74	200	6.8	0	1.95	500	21.5	12.3	17.69	700
4	15.5	5.3	0.97	50	0	0	0	0	15.5	5.3	0.97	50
5	36.5	9.0	11.42	125	12.0	3	1.13	100	31.6	7.8	12.55	225
6	37.5	19.0	11.21	100	0	0	0	0	37.5	19.0	11.21	100
7	15.0	7.0	19.44	1100	0	0	0	0	15.0	7.0	19.44	1100
Means/ Medias (± SD)	28.0 (±13.9)	12.5 (±8.0)	14.1 (±10.7)	285.7 (±364.5)	9.4 (±4.8)	3.0 (±1.1)	1.5 (±0.8)	300.0 (±186.4)	26.0 (±12.6)	12.2 (±8.9)	14.6 (±10.7)	371.4 (±384.7)

DBH = diameter at breast height, AB = basal area, SD = standard deviation.

DN = diámetro normal, AB = área basal, DE = desviación estándar.

**Table 3. Solar radiation variables and Leaf Area Index of the *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park. Cuadro 3. Variables de radiación solar e índice de área foliar del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.**

Site/ Sitio	Open area/ Cielo visible	LAI (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )/ IAF (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )	DSR (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )/ RSDF (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )	DSR (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )/ RSDI (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )	TSR (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )/ RST (MJ·m <sup>-2</sup> ·año <sup>-1</sup> )
1	0.2	1.68	354.9	4346.7	4701.6
2	0.3	1.36	433.6	4110.8	4544.4
3	0.1	3.47	225.9	2792.2	3018.2
4	0.7	0.23	980.2	9529.8	10510.1
5	0.5	0.47	750.0	8361.4	9111.4
6	0.3	0.97	481.5	5145.1	5626.5
7	0.2	1.78	227.2	2711.2	2938.4
Means ± DE	0.3 ± 0.2	1.42 ± 0.17	493.3 ± 279.3	5285.3 ± 2664.6	5778.7 ± 2940.7

DE = standard deviation, LAI = Leaf area index, DSR = diffuse solar radiation, DSR = direct solar radiation, TSR = total solar radiation.

DE = desviación estándar, IAF = Índice de área foliar, RSDF = radiación solar difusa, RSDI = radiación solar directa, RST = radiación solar total.

**Table 4. Partial and total fuel loads of the forest fuel complex in a *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park. Cuadro 4. Cargas parciales y totales del complejo de combustibles forestales en un bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.**

Site/ Sitio	Woody materials (Mg·ha <sup>-1</sup> )/ Materiales leñosos (Mg·ha <sup>-1</sup> )						DH/ HD	Grasses/ Zacates	Shrubs/ Arbustos	LFL/ HCF	Total fuel load/ Carga total
	1 h LT	10 h LT	100 h LT	1000 h LT(F)	Woody C/ C leñosos	1 a 100 h LT	(Mg·ha <sup>-1</sup> )	(Mg·ha <sup>-1</sup> )	(Mg·ha <sup>-1</sup> )	(Mg·ha <sup>-1</sup> )	(Mg·ha <sup>-1</sup> )
1	1.03	6.75	0	0	7.78	7.78	0	1.65	0.11	9.75	19.30
2	0	2.70	0	0	2.70	2.70	0	1.02	0	5.55	9.26
3	3.60	10.80	8.31	0	22.70	22.70	0.65	5.87	0	12.27	41.49
4	0	0	0	0	0	0	0	8.42	0	0	8.42
5	0	0	0	7.1	7.1	0	0	3.64	0	20.04	30.69
6	1.68	4.41	0	0	6.10	6.10	0	7.57	0	15.58	29.25
7	0.53	0	0	0	0.53	0.53	0	7.47	0	48.72	56.72
Mean	0.98	3.52	1.18	1.00	6.69	5.69	0.09	5.09	0.01	15.99	27.88
± SD	(±1.3)	(±4.1)	(±3.1)	(±2.7)	(±7.7)	(±8.1)	(±0.3)	(±3.0)	(±0.04)	(±15.8)	(±17.4)
Ratio (%)	3.5	12.6	4.3	3.6	24.0	20.4	0.3	18.3	0.1	57.4	100.0

LT = Lag time, F = firm woody materials, C = all woody materials. DH = dicotyledonous herbaceous, LFL = leaf litter and fermentation layer.

TR = tiempo de retardo, F = materiales leñosos firmes, C = todos los materiales leñosos. HD = herbáceas dicotiledóneas, HCF = capa de hojarasca y fermentación.

Regarding the class of woody materials, the results were as follows:

- 1) 1 h LT. The specific gravity had values from 0.29 to 0.57 g·cm<sup>-3</sup>, the mean was 0.38 g·cm<sup>-3</sup> and the coefficient of variation (CV) reached 0.18. These materials had a loading of 0.98 Mg·ha<sup>-1</sup> (Table 4) and showed a significant Pearson correlation with the 10 h LT ( $r = 0.89$ ,  $p = 0.0068$ ) and 100 h LT ( $r = 0.88$ ,  $p = 0.0096$ ) materials, the same as the 10 with

#### Cargas de combustibles forestales

La carga total media de combustibles fue 27.9 Mg·ha<sup>-1</sup> en los bosques de *P. hartwegii*. La hojarasca y capa de fermentación representaron casi 60 % de la carga, seguida por los materiales leñosos que cubrieron casi una cuarta parte (24 %), en particular aquellos con 1 a 100 h TR (20 %). Los zacates alcanzaron 18.3 % de la carga, mientras que las herbáceas dicotiledóneas y arbustos no tuvieron representatividad (Cuadro 4).

100 h LT ( $r = 0.78$ ,  $p = 0.0394$ ). They also showed a significant Pearson correlation ( $r = 0.83$ ,  $p = 0.0205$ ) with the LAI.

- 2) 10 h LT. Specific gravity ranged from 0.22 to 0.48  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; mean was 0.38  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and  $\text{CV} = 0.17$ . The mean load resulted in 3.52  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . These materials showed significant Pearson correlation ( $r = 0.82$ ,  $p = 0.0254$ ) with LAI.
- 3) 100 h LT. Specific gravity was recorded between 0.306 and 0.854  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  with a mean of 0.438  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and  $\text{CV} = 0.33$ . Also, the material had mean loading of 1.19  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Table 4). These materials showed significant Pearson correlation ( $r = 0.84$ ,  $p = 0.0179$ ) with LAI. Consequently, the sum of woody materials of 1, 10 and 100 h LT yielded significant Pearson correlation ( $r = 0.88$ ,  $p = 0.0098$ ) with LAI.
- 4) 1000 h LT. Specific gravity of firm woody materials ranged from 0.39 to 0.47  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  with a mean equal to 0.41  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and  $\text{CV} = 0.07$ . The mean load was 1.001  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . In the case of rotten materials, specific gravities of 0.27 to 0.44  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and  $\text{CV} = 0.27$  were found. This type of material was not observed in the extensive sampling. The total load of woody materials indicated significant Pearson correlation ( $r = 0.79$ ,  $p = 0.0363$ ) with LAI.

On the other hand, in the seven sampling sites, the leaf litter and fermentation layer had 0 to 100 % cover (mean = 71.4 %), but excluding one clearing in the forest with 0 % cover, ranged from 70 to 100 % (mean = 83.3 %). The depth of the leaf litter and fermentation layers, outside the referenced clearing (where the mean was 5.8 cm), ranged from 2.4 to 12.6 cm (mean = 6.7 cm). The loading of these fuels ranged from 0 (in the referenced clearing) to 48.72  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (under canopy). The mean reached 15.98  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (with the clearing included) and 18.65  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  without such clearing; the CV for the first case reached 0.99, while for the second 0.83. Only Pearson's significant correlation ( $p < 0.05$ ) was found between the depth of the leaf litter and fermentation layers with the load of the same layers ( $r = 0.86$ ,  $p = 0.014$ ).

#### *Relationship between forest variables and partial loads of forest fuels*

Six linear models were significant and complied with the parameters of normality, non-heteroscedasticity, non-multicollinearity and non-autocorrelation. Such models allowed estimating the cover of grasses from the clearing; the load of materials with 1 and 10 h LT, load from 1 to 100 h LT and total fuel load as a function of LAI; and the load of leaf litter and fermentation layer from the depth of the same layers (Table 5; Figures 2 and 3). Pearson's correlation was found between total

En el componente de zacates, las coberturas representaron 25 a 80 % (media = 45 %), sus alturas de 28.3 a 81.7 cm (media = 67.6 cm) y el volumen del cubo imaginario (producto de la cobertura por la altura) resultó entre 0.071 y 0.626  $\text{m}^3$  (media = 0.324  $\text{m}^3$ ). La carga de zacates en el bosque de pino fue de 1.018 a 8.417  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (media = 5.091  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). No se encontró correlación significativa entre la carga de los zacates con las variables de altura, cobertura y volumen del cubo imaginario, tampoco con las variables de radiación ni con el IAF en el bosque de *P. hartwegii*.

Con respecto a la clase de materiales leñosos, los resultados fueron los siguientes:

- 1) 1 h TR. La gravedad específica tuvo valores de 0.29 a 0.57  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , la media fue 0.38  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y el coeficiente de variación (CV) alcanzó 0.18. Estos materiales tuvieron una carga de 0.98  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Cuadro 4) y exhibieron una correlación de Pearson significativa con los materiales de 10 h TR ( $r = 0.89$ ,  $p = 0.0068$ ) y de 100 h TR ( $r = 0.88$ ,  $p = 0.0096$ ), al igual que los de 10 con los de 100 h TR ( $r = 0.78$ ,  $p = 0.0394$ ). También mostraron una correlación significativa de Pearson ( $r = 0.83$ ,  $p = 0.0205$ ) con el IAF.
- 2) 10 h TR. La gravedad específica varió entre 0.22 y 0.48  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; la media fue 0.38  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $\text{CV} = 0.17$ . La carga media resultó en 3.52  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Estos materiales mostraron correlación significativa de Pearson ( $r = 0.82$ ,  $p = 0.0254$ ) con el IAF.
- 3) 100 h TR. La gravedad específica se registró entre 0.306 y 0.854  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  con una media de 0.438  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $\text{CV} = 0.33$ . Asimismo, el material tuvo carga media de 1.19  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Cuadro 4). Estos materiales mostraron correlación de Pearson significativa ( $r = 0.84$ ,  $p = 0.0179$ ) con el IAF. En consecuencia, la suma de materiales leñosos de 1, 10 y 100 h TR arrojó correlación significativa de Pearson ( $r = 0.88$ ,  $p = 0.0098$ ) con el IAF.
- 4) 1000 h TR. La gravedad específica de materiales leñosos firmes varió de 0.39 a 0.47  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  con una media igual a 0.41  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $\text{CV} = 0.07$ . La carga media fue 1.001  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . En el caso de los materiales podridos se obtuvieron gravedades específicas de 0.27 a 0.44  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y  $\text{CV} = 0.27$ . No se observaron este tipo de materiales en el muestreo extensivo. La carga total de materiales leñosos indicó correlación significativa de Pearson ( $r = 0.79$ ,  $p = 0.0363$ ) con el IAF.

Por otra parte, en los siete sitios de muestreo, la capa de hojarasca y fermentación tuvo cobertura de 0 a 100 % (media = 71.4 %), pero excluyendo un claro en el bosque con 0 %, la cobertura varió entre 70 y 100 % (media = 83.3 %). La profundidad de las capas de hojarasca y

tree stand basal area and the sum of woody fuel loads from 1, 10 and 100 h LT ( $r = 0.95$ ,  $p = 0.0043$ ).

#### Relationship between forest variables and total fuel load

A significant Pearson correlation ( $r = 0.74$ ,  $p = 0.0595$ ) was established between the average diameter at breast height of all trees and the total forest fuel load. The following fitted model allows estimating the total forest fuel load (TL), from the depth of leaf litter and fermentation layers (dlfl) (Figure 4):  $TL = \exp(2.2779 + 0.1961 \text{ dlfl})$ . With this model we found  $R^2 = 0.95$  ( $p = 0.0004$ ), confidence limits from 1.432 to 3.123 for the constant and from 0.081 to 0.310 for the constant associated to the explanatory variable.

#### Subalpine grassland

Coverages from 20 to 100 %, mean heights from 0.47 to 0.90 m and individual heights from 20 to 110 cm were determined in the grassland area. Per sampling site, mean loads ranged from 2.182  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  to 17.991  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  and the following average values were obtained: 6842  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  load, 65.0 cm height and 46.4 % cover (Table 6; Figure 5).

capa de fermentación, fuera del claro referido (donde la media fue 5.8 cm), midió 2.4 a 12.6 cm (media = 6.7 cm). La carga de estos combustibles varió de 0 (en el claro referido) hasta 48.72  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (bajo dosel). La media alcanzó 15.98  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (con el claro incluido) y 18.65  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  sin dicho claro; el CV para el primer caso alcanzó 0.99, mientras que para el segundo 0.83. Solo se encontró correlación significativa de Pearson ( $p < 0.05$ ) entre la profundidad de las capas de hojarasca y de fermentación con la carga de las mismas capas ( $r = 0.86$ ,  $p = 0.014$ ).

#### Relación entre variables del bosque y cargas parciales de combustibles forestales

Seis modelos lineales resultaron significativos, además cumplieron con los parámetros de normalidad, no heterocedasticidad, no multicolinealidad y no autocorrelación. Tales modelos permitieron estimar la cobertura de zacates a partir del cielo visible; la carga de los materiales con 1 y 10 h TR, carga de 1 a 100 h TR y carga total como función del IAF; y la carga de hojarasca y capa de fermentación a partir de la profundidad de las mismas capas (Cuadro 5; Figuras 2 y 3). Se encontró correlación de Pearson entre el

**Table 5. Linear relationship between forest variables and forest fuel loads in two vegetation types at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park.**

**Cuadro 5. Relación lineal entre variables del bosque y cargas de combustibles forestales en dos tipos de vegetación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.**

Model/ Modelo	R <sup>2</sup>	P value/ Valor p	RMSE/ RCME	p, SW	p, W	VIV, M/ VIF, M	Durbin- Watson
<b>Subalpine grassland/Zacatonal subalpino</b>							
G1 = - 2.7668 + 0.207 (coz)/ Cz = - 2.7668 + 0.207 (coz)	0.95	0.0002	1.4058	0.4651	0.2437	1.000	1.949
<b>Pinus hartwegii Forest/Bosque de Pinus hartwegii</b>							
Gc = 20.082 + 72.88 (cl)/ Coz = 20.082 + 72.88 (cievi)	0.71	0.0179	11.1123	0.0739	0.3787	1.000	1.708
L1 = - 0.4762 + 1.0231 (LAI)/ C1 = - 0.4762 + 1.0231 (IAF)	0.69	0.0205	0.8045	0.8443	0.2603	1.000	2.473
L10 = - 0.933 + 3.1352 (LAI)/ C10 = - 0.933 + 3.1352 (IAF)	0.66	0.0254	2.6160	0.2279	0.3322	1.000	2.009
WL = - 1.3399 + 5.649 (LAI)/ CL = - 1.3399 + 5.649 (IAF)	0.62	0.0363	27.3262	0.7945	0.5964	1.000	1.796
L1a100 = - 3.7203 + 6.6194 (LAI)/ C1a100 = - 3.7203 + 6.6194 (IAF)	0.77	0.0098	4.2923	0.1603	0.2634	1.000	1.912
Llfl = - 6.37 + 4.7292 (dlfl)/ Chcf = - 6.37 + 4.7292 (phcf)	0.73	0.0140	3.1221	0.9244	0.3131	1.000	1.863

G1 = grassland load, Gc = grassland cover, cl = clearing, LAI = leaf area index, L1 = woody material load with 1 h LT (lag time), L10 = woody material load with 10 h LT, WL = woody material load, L1a100 = woody material load from 1 to 100 h LT, llfl = leaf litter and fermentation layer load, dlfl = depth. R<sup>2</sup> = coefficient of determination, RMSE = root mean square error; p, SW = p-value for Shapiro-Wilks test; p, W = p-value for White's test; VIV, M = variance inflation value.

Cz = carga zacatonal, coz = cobertura de zacates, cievi = cielo visible, IAF = índice de área foliar, C1 = carga de materiales leñosos con 1 h TR (tiempo de retardo), C10 = carga de materiales leñosos con 10 h TR, CL = carga de materiales leñosos, C1a100 = carga de materiales leñosos de 1 a 100 h de TR, chcf = carga de hojarasca y capa de fermentación, phcf = profundidad. R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación, RCME = raíz cuadrada del cuadrado medio del error; p, SW = valor de p para la prueba de Shapiro-Wilks; p, W = valor de p para la prueba de White; VIF, M = valor de inflación de varianza.

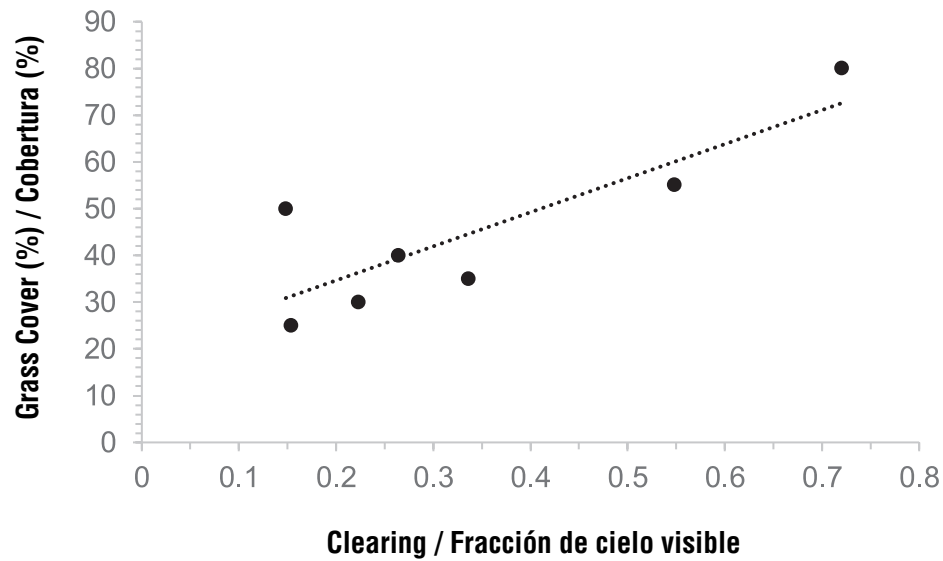


Figure 2. Relationship between grass cover and clearing in *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park.  
 Figura 2. Relación entre cobertura de zacates y fracción de cielo visible en bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

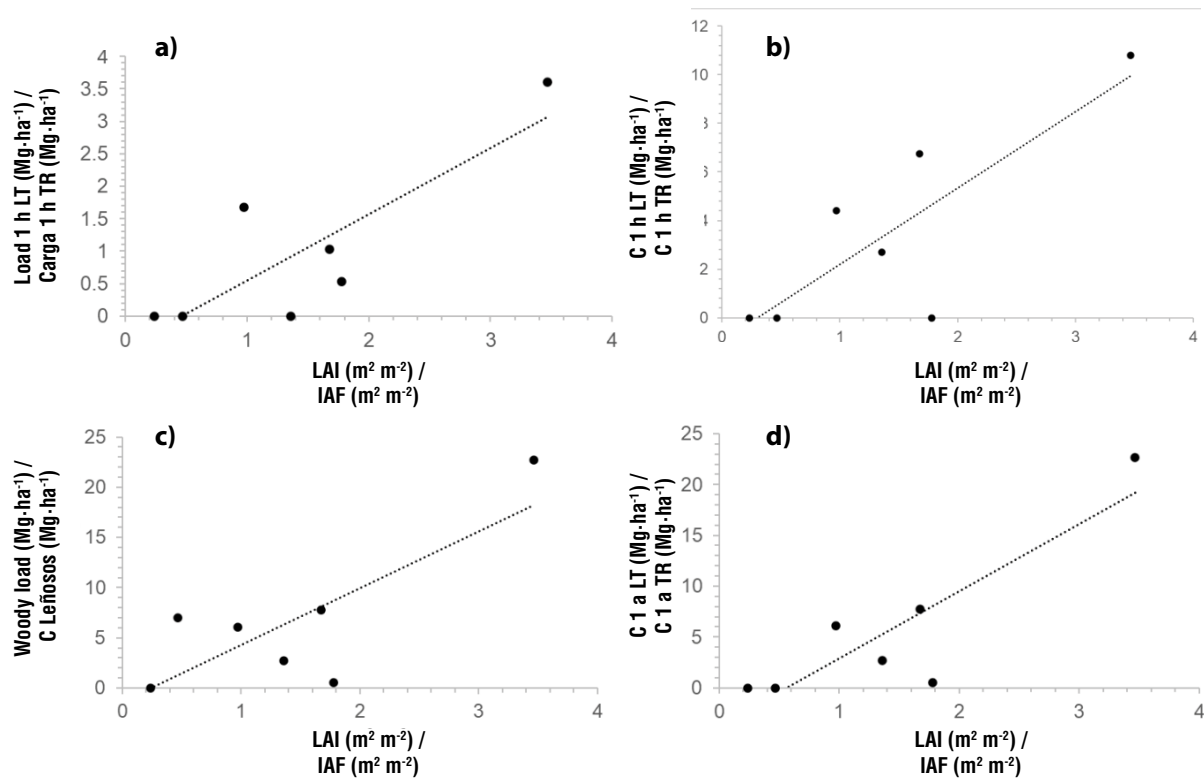


Figure 3. Linear regressions between leaf area index (LAI) and woody loads (L): a) 1 h LT (lag time), b) 10 h LT, c) total wood and d) 1 to 100 h LT in a *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park.

Figura 3. Regresiones lineales entre índice de área foliar (IAF) y cargas (C) de materiales leñosos: a) 1 h TR (tiempo de retardo), b) 10 h TR, c) total leñosos y d) 1 a 100 h TR en un bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

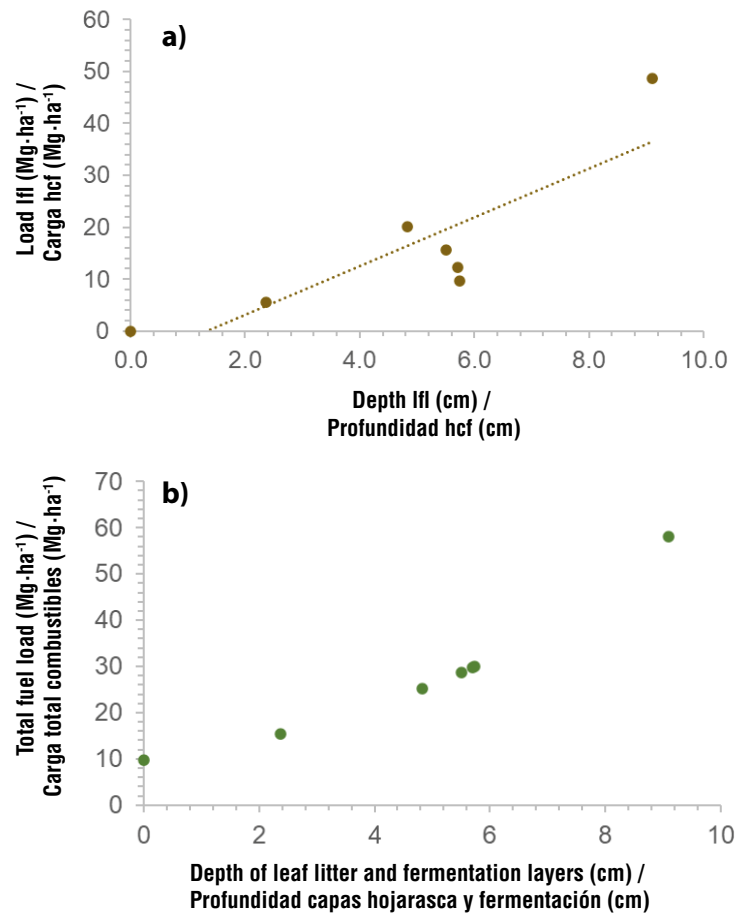


Figure 4. a) Linear model relating leaf litter and fermentation layer load (lfl) according to depth. B) Inverse of the transformed model (non-linear exponential) between total fuel complex loading and leaf litter and fermentation layer depth in a *Pinus hartwegii* forest at the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park.

Figura 4. a) Modelo lineal que relaciona la carga de la capa de hojarasca y fermentación (hcf) como función de su profundidad. B) Inversa del modelo transformado (no lineal exponencial) entre carga total del complejo de combustibles y la profundidad de la capa de hojarasca y de fermentación en un bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

To estimate the biomass of the grassland, including the portion that is generally not consumed during forest fires, all biomass (including the woody core of clumps of the grasses) was harvested at a single site, recording cover of 80 %, average height of 78.3 cm, and anhydrous biomass of 30.704 Mg·ha<sup>-1</sup>. Although radiation was not measured in the subalpine grassland because there was no tree canopy, it is similar to or greater than that of the forest clearing (site 4, Table 3).

The only significant model meeting the parameters referred to in the methodology (normality, no heteroscedasticity, no multicollinearity or autocorrelation) was the one that related the load of grasses and its cover, with  $R^2 = 0.95$  and  $p = 0.0002$  (Table 5).

área basal total del arbolado y la suma de las cargas de combustibles leñosos de 1, 10 y 100 h TR ( $r = 0.95$ ,  $p = 0.0043$ ).

#### Relación entre variables del bosque y carga total de combustibles

Se estableció correlación significativa de Pearson ( $r = 0.74$ ,  $p = 0.0595$ ) entre el diámetro normal medio de todo el arbolado y la carga total de combustibles forestales. El siguiente modelo ajustado permite estimar la carga total de combustibles forestales (CT), a partir de la profundidad de las capas de hojarasca y de fermentación (phcf) (Figura 4):  $CT = \exp(2.2779 + 0.1961phcf)$ . Con este modelo se obtuvo  $R^2 = 0.95$  ( $p = 0.0004$ ), límites de confianza de 1.432 a 3.123 para la

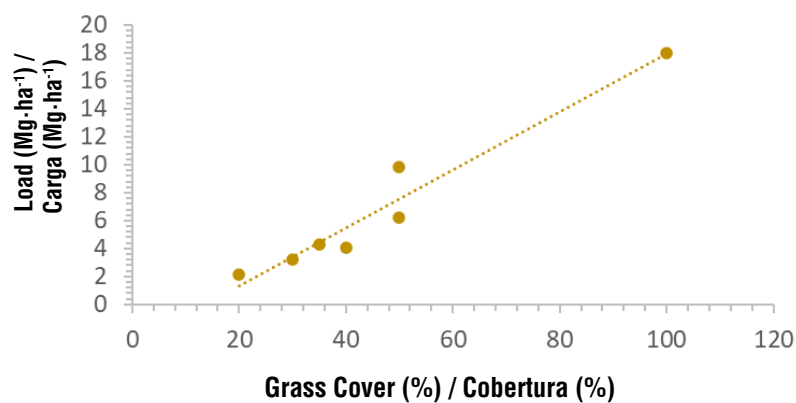
Table 6. Loads, cover and height of subalpine grassland at the Iztacchuatl-Popocatepetl National Park.

Cuadro 6. Cargas, cobertura y altura del zacatonal subalpino en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl.

Site/ Sitio	Cover (%) / Cobertura (%)	Height (m) / Altura (m)	Load (Mg·ha <sup>-1</sup> ) / Carga (Mg·ha <sup>-1</sup> )
1	50	0.63	6.23
2	50	0.73	9.88
3	30	0.65	3.25
4	40	0.60	4.08
5	35	0.60	4.27
6	20	0.47	2.18
7	100	0.90	17.99
Means ± SD / Medias ± DE	46.4 ± 25.9	0.65 ± 0.13	6.842 ± 5.52

SD: standard deviation of the mean.

DE: desviación estándar de la media.

Figure 5. a) Subalpine grassland at the Iztacchuatl-Popocatepetl National Park (PNIP). In the middle-left side, low-density *Pinus hartwegii* forest. b) Relationship between fuel load and subalpine grassland cover at the PNIP.Figura 5. a) Zacatonal subalpino en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl (PNIP). En el plano medio a la izquierda, bosque de baja densidad de *Pinus hartwegii*. b) Relación entre la carga de combustible y la cobertura de pastizal subalpino del PNIP.

## Discussion

### *Pinus hartwegii* forest

#### Tree measurement characteristics

Due to the high altitude in the study area (3555 m - 3786 m) with low temperatures and limitation by humidity, due to water freezing for part of the year and strong winds, *P. hartwegii* does not reach large dimensions (DBH = 26 cm, height = 12.2 m) as at lower altitudinal levels, as reported by CONANP (2013).

#### Solar radiation

The radiation levels recorded overlap with the range referred by Islas-Madrid et al. (2013) for *P. hartwegii* forests in Mexico City (CDMX), with a clearing equal to 0.39, diffuse solar radiation of 544.3 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>, direct solar radiation of 6092.3 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup> and total solar radiation of 6756.6 MJ·m<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>, values similar to the means in this study.

#### Fuel load

The average total fuel load (27.9 Mg·ha<sup>-1</sup>) from this study falls within the range reported (23.95 to 33.81 Mg·ha<sup>-1</sup>) for a *P. hartwegii* forest in Estado de México by Castañeda-Rojas et al. (2015); however, one site was found with a much higher total fuel load of 56.72 Mg·ha<sup>-1</sup>. This site is productive in both live and dead matter and has not been affected by fire for several years, as fire exclusion increases fuel loads (Scott et al., 2014).

In the present study, a higher grass load was observed as the clearing increased. This is because grasslands and alpine paramos (mostly subalpine grasslands) prefer open areas, which are often the result of forest destruction (where possible at such altitudes), as most grasses follow the C4 photosynthetic pathway and therefore prefer higher levels of solar radiation (Krebs, 2016; Lambers & Oliveira, 2019; Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014). This trend is also consistent with the findings of Islas-Madrid et al. (2013), who report that at higher radiation levels, there is an increase in the cover and dominance of *Muhlenbergia quadridentata* Trin., a common grass in *P. hartwegii* forests in Mexico City. Similarly, Caballero-Cruz et al. (2018) found higher grass loads in open stands compared to high-density stands in a temperate forest in Oaxaca.

The LAI is an indicator of productivity in tree species and, consequently, it is also an indicator of the presence of trees. Therefore, a relationship was found between the load of woody materials from 1, 10, 1 to 100 h LT and total with this index. It is evident that with a greater presence of trees, the number of

constante y de 0.081 a 0.310 para la constante asociada a la variable explicativa.

### Zacatonal subalpino

En el área con zacatonal se determinaron coberturas de 20 a 100 %, alturas medias de 0.47 a 0.90 m y alturas individuales de 20 a 110 cm. Por sitio de muestreo, las cargas medias variaron entre 2.182 Mg·ha<sup>-1</sup> hasta 17.991 Mg·ha<sup>-1</sup> y se obtuvieron los valores promedio siguientes: 6.842 Mg·ha<sup>-1</sup> de carga, 65.0 cm de altura y 46.4 % de cobertura (Cuadro 6; Figura 5).

Para tener idea de la biomasa del zacatonal, considerando también la que generalmente no se consume en los incendios forestales, se cosechó toda la biomasa (incluido el núcleo leñoso del macollo de los zacates) en un solo sitio; este registró cobertura de 80 %, altura media de 78.3 cm y biomasa anhidra de 30.704 Mg·ha<sup>-1</sup>. Aunque en el zacatonal subalpino no se midió radiación por no haber dosel arbóreo, se considera que es similar o mayor que la del claro de bosque (sitio 4, Cuadro 3).

El único modelo significativo que cumplió con los parámetros referidos en la metodología (normalidad, no heterocedasticidad, no multicolinealidad ni autocorrelación) fue el que relacionó carga de zacates y su cobertura, con  $R^2 = 0.95$  y  $p = 0.0002$  (Cuadro 5).

## Discusión

### Bosque de *Pinus hartwegii*

#### Variables dasométricas

Debido a la gran altitud en el área de estudio (3555 m - 3786 m) con temperaturas bajas y limitación por humedad, a causa del congelamiento del agua durante parte del año y a los fuertes vientos, *P. hartwegii* no alcanza dimensiones grandes (DN = 26 cm, altura = 12.2 m) como en cotas altitudinales más bajas, tal como refiere la CONANP (2013).

#### Radiación solar

Los niveles de radiación registrados se traslapan con el rango referido por Islas-Madrid et al. (2013) para bosques de *P. hartwegii* de la Ciudad de México (CDMX), con una fracción de cielo visible igual a 0.39, radiación solar difusa de 544.3 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, radiación solar directa de 6092.3 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup> y radiación solar total de 6756.6 MJ·m<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, cifras semejantes a las medias del presente trabajo.

#### Carga de combustibles

La media de la carga total (27.9 Mg·ha<sup>-1</sup>) de este estudio se encuentra en el intervalo referido (23.95 a



woody materials increases on the forest floor. This was observed despite the disturbance caused by firewood collection and past fires. Likewise, in pine forests in Durango under forest management, through the silvicultural treatments of selection, thinning, and regeneration cutting, in that order, there was a progressively greater load of woody materials (Bautista-Rentería-Ánima et al., 2005). Similarly, in *P. sylvestris* Lour. stands in Ukraine, the percentages of all woody materials increased with stand age (Hurzhii et al., 2021) and with canopy cover in Chinese forests of *Picea schrenkiana* Fisch. & C. A. Mey. (Liang et al., 2017).

Regarding leaf litter and fermentation layer, without fire or disturbance from extraction, all types of materials accumulate on the forest floor. Some of the woody materials can be extracted as firewood, but not leaf litter and fermentation layer, which restarts its accumulation after fires, whether ecological succession occurs or remains steady. This latter aspect is observed in the present study, as the grassland can advance to pine forest, but both can persist under a different fire regime, with more frequent fires in the grassland (Rodríguez-Trejo, 2014; Rzedowski, 1981). A study that shows changes in fuel load due to succession was carried out in forests dominated by *Pinus douglasiana* Martínez, in Jalisco, where Quintero-Gradilla et al. (2019) established that, as ecological succession progressed, leaf litter and fermentation layer increased their load between 8 and 28 years of age of the stand. A similar case was also studied in *P. sylvestris* forests in Ukraine, where the percentage of the fermentation layer increased from 15 % in young stands to 43 % in mature stands (Hurzhii et al., 2021).

#### **Relationship between forest variables and forest fuel loads**

The positive linear relationship between LAI and woody material loads of 1, 10 LT, 1 to 100-hour LT, and total fuel load is explained by the fact that higher values of this index are associated with greater productivity. A similar trend was observed for total fuel load in *Quercus crassifolia* forests in Puebla, where Rodríguez-Trejo et al. (2021) found a direct positive relationship with the number of trees. The same study reports a positive logarithmic relationship between total fuel load and the basal area of the trees. In the case of the positive relationship between depth and leaf litter load and the fermentation layer, the first variable is a direct indicator of the second.

#### **The implications**

There is a range of fuel loads in the area, from light (<10 Mg·ha<sup>-1</sup>) to heavy (>50 Mg·ha<sup>-1</sup>). The lighter loads indicate open conditions with grassland dominance, as well as some fire recurrence, which contributes

33.81 Mg·ha<sup>-1</sup>) para un bosque de *P. hartwegii* del Estado de México por Castañeda-Rojas et al. (2015); sin embargo, se encontró un sitio con una carga total mucho más elevada, 56.72 Mg·ha<sup>-1</sup>, el cual es un sitio productivo tanto de materia viva como muerta que no ha sido afectado por el fuego en varios años, pues la exclusión del fuego incrementa las cargas de combustibles (Scott et al., 2014).

En el presente estudio se verificó mayor carga de zacates conforme la fracción de cielo visible aumentó. Esto obedece a que los zacatonales y páramos de altura (zacatonales subalpinos en gran parte) prefieren localidades abiertas que con frecuencia se derivan de la destrucción del bosque (en las altitudes donde esto es posible), pues la mayoría de los pastos tienen senda fotosintética C4 y por ello prefieren niveles elevados de radiación solar (Krebs, 2016; Lambers & Oliveira, 2019; Miranda & Hernández-Xolocotzi, 2014). Dicha tendencia también es consistente con lo señalado por Islas-Madrid et al. (2013), quienes refieren que, a niveles mayores de radiación, hay incremento en la cobertura y dominancia de *Muhlenbergia quadridentata* Trin., un pasto común en bosques de *P. hartwegii* de CDMX. De igual forma, Caballero-Cruz et al. (2018) encontraron cargas mayores de pastos en masas abiertas que en las de alta densidad en un bosque templado de Oaxaca.

El IAF es un indicador de la productividad en especies arbóreas y, como tal, también es un indicador de la presencia de árboles. Por ello se encontró relación entre la carga de materiales leñosos de 1, 10, 1 a 100 h TR y total con dicho índice. Es evidente que, a mayor presencia de árboles, la cantidad de materiales leñosos aumenta en el piso forestal. Lo anterior se observó a pesar de la alteración por recolección de leña e incendios que pudo haber en años pasados. Asimismo, en bosques de pino en Durango bajo aprovechamiento forestal, a través de los tratamientos silvícolas de selección, aclareo y corta de regeneración donde, en dicho orden, se tuvo una carga mayor progresiva de materiales leñosos (Bautista-Rentería-Ánima et al., 2005). De forma similar, en masas de *P. sylvestris* Lour. en Ucrania, las fracciones de todos los materiales leñosos aumentaron con la edad de las masas (Hurzhii et al., 2021) y con la cobertura de copas en bosques chinos de *Picea schrenkiana* Fisch. & C. A. Mey. (Liang et al., 2017).

Con respecto a la clase hojarasca y capa de fermentación, sin fuego ni alteración por extracción, todo tipo de materiales se acumulan en el piso forestal. Parte de los materiales leñosos pueden ser extraídos como leña, no así la capa de hojarasca y de fermentación que reinicia su acumulación después de los incendios, ya sea que transcurra la sucesión ecológica o que se mantenga. Esto último se observa en el presente estudio, pues el zacatonal puede avanzar a pinar, pero uno y otro pueden

to lower fuel accumulation. The heavier loads imply dense tree cover, fire exclusion, and increased fuel load and fire risk, including crown fires, all of which is further intensified by global warming. It is crucial to manage forest fuels in areas with higher accumulation to reduce fire risk, mitigate extreme fire behavior, and lower emissions of pollutants and greenhouse gases.

## Subalpine grassland

### Total fuel load

The total forest fuel load in the grassland ( $6.84 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) is comparable to the  $7.98 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  reported by Rodríguez-Trejo and Sierra-Pineda (1996) for grasslands near pine forests or subalpine areas of Mexico City, including *Muhlenbergia*, *Festuca*, and *Calamagrostis*. This load was higher in the forest than in the grassland, consistent with the progression of ecological succession from grasslands to pine forests in Mexico City (Rodríguez-Trejo & Sierra-Pineda, 1996).

### Relationship between grassland and fuel load

Grass cover is one of the key characteristics of this fuel complex and is linearly related to the load. As there are more and larger individuals in this type of vegetation, its cover and load increase. This trend was well represented by the significant linear regression ( $R^2 = 0.95$ ;  $p = 0.0002$ ). The higher the cover, the higher the biomass or load in the grassland (Rodríguez-Trejo, 2014). At the same time, higher values of clearing resulted in higher values of grass cover, since most grasses have a C4 photosynthetic pathway and require direct solar radiation to develop (Krebs, 2016).

### The implications

In general, and as is typical, grass loads were not high ( $3.3$  to  $9.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Steep slopes and strong winds in the fire season, can lead to significant fire speeds and intensities. One site reached  $18 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , due to its higher productivity and fire exclusion or the age of the grassland. Therefore, it is also necessary to think about fuels management in areas with higher potential for extreme fire behavior. One of the options may be prescribed fire.

## Conclusions

In the *P. hartwegii* forest and the subalpine grassland, statistical models were developed that relate forest fuel loads to light environment variables or to fuel-specific variables. Understanding these models is useful for streamlining estimates and gaining better insight into the characteristics, which helps make more accurate predictions about fire risk, fire behavior, and pollutant

mantenerse por un régimen diferente de fuego con incendios más frecuentes para el zacatonal (Rodríguez-Trejo, 2014; Rzedowski, 1981). Un estudio que evidencia cambio de carga por sucesión se llevó a cabo en bosques dominados por *Pinus douglasiana* Martínez, en Jalisco, donde Quintero-Gradilla et al. (2019) establecieron que, al avanzar la sucesión ecológica, la hojarasca y la capa de fermentación aumentaron su carga entre los 8 y 28 años del rodal. Un caso similar se investigó también en bosques de *P. sylvestris* de Ucrania, en los cuales la fracción de la capa de fermentación aumentó de 15 % en masas jóvenes a 43 % en masas maduras (Hurzhii et al., 2021).

### Relación entre variables del bosque y cargas de combustibles forestales

La relación lineal positiva entre IAF y cargas de materiales leñosos de 1, 10 TR, 1 a 100 h TR y la carga total se explica porque los valores más altos de dicho índice se asocian con mayor productividad. Una tendencia semejante se observó para la carga total en bosques de *Quercus crassifolia* en Puebla, donde Rodríguez-Trejo et al. (2021) hallaron relación directa positiva con el número de árboles. El mismo estudio refiere relación logarítmica positiva entre carga total y área basal del arbolado. En el caso de la relación positiva entre profundidad y carga de hojarasca y capa de fermentación, la primera variable es un indicador directo de la segunda.

### Implicaciones

Existe una gama de cargas de combustibles en la zona, desde ligeras ( $<10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) a pesadas ( $>50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Las primeras muestran condiciones abiertas con dominancia de zacatonal, así como cierta recurrencia del fuego que contribuye a una acumulación menor de combustibles. Las segundas implican condiciones de arbolado denso y exclusión del fuego e incrementan la carga y el peligro de incendio, incluso de copas, aunado todo ello al calentamiento global. Es importante realizar manejo de combustibles forestales en las zonas de mayor acumulación, para tener menor peligro de incendio, comportamiento del fuego menos extremo y emisiones más bajas de contaminantes y gases efecto invernadero.

## Zacatonal subalpino

### Carga total

La carga total de combustibles forestales en el zacatonal ( $6.84 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) es similar a la obtenida por Rodríguez-Trejo y Sierra-Pineda (1996), quienes señalan  $7.98 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en zacatonales en zonas aledañas a pinares o en zonas subalpinas de la CDMX, con especies de *Muhlenbergia*, *Festuca* y *Calamagrostis*. Dicha carga fue más elevada en el

emissions, thereby supporting fuel management decisions. In the forest, increased clearings lead to higher grass fuel loads. Conversely, a greater presence of canopies (higher leaf area index values) results in a higher load of woody materials. In the pine forest, total forest fuel load can be estimated using the depth of leaf litter and fermentation layers, while in the subalpine grassland, it can be estimated based on grass cover. As ecological succession progresses from grassland to pine forest, fuel loads increase.

### Acknowledgments

Thanks to the authorities of the Iztaccíhuatl-Popocatepetl National Park for their permission to conduct this study; to the Universidad Autónoma Chapingo and the Comisión Ambiental de la Megalópolis for their support; to Leticia Camacho Reséndiz and Emiliano Rodríguez Camacho for their assistance during fieldwork; and to Alejandro Corona Ambriz for his guidance on the exponential model treatment.

### End of English version

### References / Referencias

- Bautista-Rentería-Ánima, J., Treviño-Garza, E. J., Nívar-Chaidez, J. de J., Aguirre-Calderón, O. A., & Cantú-Silva, L. (2005). Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 51–56. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62911108>
- Brown, J. K. (1974). *Handbook for inventorying downed woody material. General Technical Service INT-16*. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Caballero-Cruz, P., Santiago-Juárez, W., Martínez-Santiago, D., Cruz-Santiago, O. L., Pérez-Silva, E. R., & Aguirre-Calderón, O. A. (2018). Combustibles forestales y susceptibilidad a incendios de un bosque templado de la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana*, 20(1), 9–14. <https://www.redalyc.org/journal/497/49757295003/html/>
- Castañeda-Rojas, M. F., Endara-Agramont, A. R., Villers-Ruiz, M. L., & Nava-Bernal, E. G. (2015). Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y Bosques*, 21(2), 45–58. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.212444>
- Chávez-Durán, A. A., Bustos-Santana, A., Chávez-Durán, H. M., De la Mora-Orozco, C., Flores-Garnica, J. G., Rubio-Camacho, E. A., & Xelhuazntzi-Carmona, J. (2021). Distribución espacial de cargas de combustibles en una parcela de muestreo de pino-encino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 112–133. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.787>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2013). *Programa de manejo. Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*. bosque que en el pastizal, como corresponde conforme avanza la sucesión ecológica de pastizales a bosques de pino en la CDMX (Rodríguez-Trejo & Sierra-Pineda, 1996).
- Relación entre variables del zacatonal y la carga de combustibles**
- La cobertura del zacatonal es una de las propiedades más importantes de dicho complejo de combustibles y se relaciona linealmente con la carga. En la medida que en este tipo de vegetación hay más individuos y de mayor tamaño, su cobertura y carga aumentan. Esta tendencia quedó bien representada por la regresión lineal significativa ( $R^2 = 0.95$ ;  $p = 0.0002$ ). La mayor cobertura arroja mayor biomasa o carga en el zacatonal (Rodríguez-Trejo, 2014). A su vez, a valores mayores de cielo visible se tuvieron valores más altos de cobertura de zacates, pues la mayoría de los pastos tienen senda fotosintética C4 y requieren de radiación solar directa para desarrollarse (Krebs, 2016).
- Implicaciones**
- En general, y como es común, las cargas del zacatonal no fueron altas (3.3 a 9.9 Mg·ha<sup>-1</sup>). Las pendientes pronunciadas, así como los vientos veloces en la temporada de incendios, pueden imprimir velocidades e intensidades considerables al fuego. Un sitio alcanzó 18 Mg·ha<sup>-1</sup>, debido a su mayor productividad y a exclusión del fuego o vejez del zacatonal. Por ello también es necesario pensar en el manejo de combustibles en las zonas con mayor potencial de comportamiento extremo del fuego. Una de las opciones puede ser el fuego prescrito.
- Conclusiones**
- En el bosque de *P. hartwegii* y en el zacatonal subalpino se obtuvieron modelos estadísticos que relacionan cargas de combustibles forestales con variables del ambiente de luz o con variables propias de los combustibles. Es útil entender estos modelos para agilizar estimaciones y tener mayor conocimiento de las características con el fin de hacer predicciones más precisas sobre peligro de incendio, comportamiento del fuego y emisiones de contaminantes, y así sustentar decisiones de manejo de combustibles. Los aumentos en cielo visible en el bosque conducen a una mayor carga de zacates. Por el contrario, la presencia mayor de copas (valores elevados de índice de área foliar) propicia una carga más alta de materiales leñosos. En el bosque de pino, la carga total de combustibles forestales se puede estimar con la profundidad de las capas de hojarasca y fermentación; en el zacatonal subalpino, con la cobertura del pastizal. Al avanzar la sucesión ecológica de zacatonal a pinar, la carga de combustibles aumenta.

[https://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/pdf/programas\\_manejo/2014/IZTA\\_POPO\\_2014.pdf](https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2014/IZTA_POPO_2014.pdf)

- Delta T. Company. (1998). *Hemiview canopy analysis software. Version 2.1 SR4*. United Kingdom: Delta T. Devices Ltd.
- Flores-Garnica, J. G., Wong-González, J., & Paz-Pellat, F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y Bosques*, 24(sup. esp. e2401893), 1–15. doi: 10.21829/myb.2018.2401893
- Hurzhi, R. V., Yavorovskyi, P. P., Sydorenko, S. H., Levchenko, V. B., Tyshchenko, O. M., Tertyshnyi, A. P., & Yakubenko, B. Y. (2021). Trends in forest fuel accumulation in pine forests of Kyiv Polissya in Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Seria A (Forestry)*, 63(2), 116–124. doi: 10.2478-ffp-2021-0013
- Islas-Madrid, G. E., Rodríguez-Trejo, D. A., & Martínez-Hernández, P. A. (2013). Diversidad del sotobosque y radiación solar en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. con quema prescrita. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 25–40. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n15/v4n15a3.pdf>
- Krebs, C. J. (2016). *Ecology. The experimental analysis of distribution and abundance*. Pearson.
- Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2019). *Plant physiological ecology* (3<sup>rd</sup>. ed.). Springer.
- Liang, Y., Li, J. M., Zhao, F., Zhang, Y., Kong, T., & Nurgul, M. (2017). Surface fuel loads of Tianshan spruce forests in the central Tianshan Mountains and the impact factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(12), 153–160. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183217164>
- Miranda, F., & Hernández-Xolocotzi, E. (2014). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. Sociedad Botánica de México-CONABIO-FCE-Ed. Científicas Universitarias.
- Morfín-Ríos, J. E., Jardel-Peláez, E., Alvarado-Celestino, E., & Michel-Fuentes, J. M. (2012). *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. CONAFOR-Universidad de Guadalajara. <https://camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Caracterizacion-y-cuantificacion-de-combustibles-Forestales.pdf>
- Quintero-Gradilla, S. D., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., & Martínez-Ytizar, A. (2019). Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera y Bosques*, 25(3), e2531888, 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531888>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia*. (vol. 1.). CP-UACH-SEMARNAT-CONAFOR-CONANP-PNIP.
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Sierra-Pineda, A. (1996). Evaluación de los combustibles forestales en los bosques del Distrito Federal. *Revista Ciencia Forestal en México*, 20(77), 193–218. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1028/2343>
- Rodríguez-Trejo, D. A., Rodríguez-Aguilar, M., Villanueva-Morales, A., & Bonilla-Padilla, E. (2021). Estimación de combustibles en bosque de *Quercus crassifolia* en México central. *Revista Incendios y Riesgos Naturales*, 4, 33–35. [https://revistarim.org/wp-content/uploads/2021/09/RIyRN\\_Septiembre2021\\_n04hq.pdf](https://revistarim.org/wp-content/uploads/2021/09/RIyRN_Septiembre2021_n04hq.pdf)
- Rzedowski, J. (2010). Principales comunidades vegetales. In J. Rzedowski, & G. Calderón de Rzedowski (Coords.), *Flora fanerogámica del Valle de México* (pp. 47–54). CECOSA. [https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora\\_del\\_Valle\\_de\\_Mx1.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora_del_Valle_de_Mx1.pdf)
- Scott, A. C., Bowman, D. M. J. S., Bond, W. J., Pyne, S. J., & Alexander, M. E. (2014). *Fire on Earth. An introduction*. Wiley, Blackwell.

## Agradecimientos

A las autoridades del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl por su permiso para la conducción del presente estudio; a la Universidad Autónoma Chapingo y a la Comisión Ambiental de la Megalópolis por los apoyos proporcionados; a Leticia Camacho Reséndiz y a Emiliano Rodríguez Camacho por su ayuda durante el trabajo de campo. A Alejandro Corona Ambriz por su orientación para el tratamiento del modelo exponencial.

## Fin de la versión en español