



# Efectos del fuego

## sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal

### Effects of fire on soil physical, chemical and nutritional characteristics in forest vocation lands

Marcos Pedro Ramos-Rodríguez<sup>1\*</sup>, Marlon Javier Tigua-Parrales<sup>1</sup>, Jerry Bryan Baque-Ramos<sup>2</sup>,  
Tayron Omar Manrique-Toala<sup>1</sup> y Alfredo Lesvel Castro-Landín<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Forestal. Jipijapa, Manabí, Ecuador.  
marcos.ramos@unesum.edu.ec;  
marlontigua@gmail.com;  
tyron.manrique@unesum.edu.ec

<sup>2</sup> Consultor independiente. Manabí, Ecuador.  
jbryan\_199411@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Ambiental. Jipijapa, Manabí, Ecuador.  
alfredo.castro@unesum.edu.ec

\* Autor de correspondencia.  
marcos.ramos@unesum.edu.ec

#### RESUMEN

El uso del fuego es una práctica común en la agricultura, por lo que resulta importante comprender sus efectos en las propiedades del suelo para un mejor manejo de este. El objetivo del presente trabajo fue evaluar los efectos del fuego sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal en Jipijapa, Manabí, Ecuador. Para el desarrollo de la investigación se utilizó un diseño no experimental. Se delimitaron diez parcelas en combustibles apilados en hileras y tres en combustibles dispersos. En los análisis se consideraron variables meteorológicas, del material combustible y del comportamiento del fuego, así como algunas características físicas, químicas y nutricionales del suelo antes y después de la quema. Las diferencias de los valores medios de las variables del material combustible y de los parámetros del comportamiento del fuego fueron estadísticamente significativas, siendo mayores en las parcelas ubicadas en combustibles apilados. En ambos tipos de parcelas, tres meses después de la quema, los valores medios de las características del suelo, si bien fueron inferiores y diferentes estadísticamente a los que existían antes de aplicar el fuego, alcanzaron niveles numéricamente similares a los mismos, siendo algunos de ellos superiores para el caso de los combustibles dispersos. El estudio brinda una información que, aunque limitada por el poco tiempo transcurrido para hacer las mediciones después de la quema, puede ser utilizada para la toma de decisiones en el contexto de la regulación del uso del fuego en tierras de vocación forestal.

**PALABRAS CLAVE:** comportamiento del fuego, manejo del fuego, material combustible, propiedades del suelo, quemas controladas, usos del fuego.

#### ABSTRACT

Fire use is a common practice in agriculture, so it is important to understand its effects on soil properties for better soil management. This study aimed to evaluate the effects of fire on the physical, chemical, and nutritional characteristics of the soil on forest vocation lands in Jipijapa, Manabí, Ecuador. A non-experimental design was used to develop the research. Ten plots were delimited in fuels stacked in rows and three in dispersed fuels. The analyses considered meteorological variables, fuel material, and fire behavior, as well as some physical, chemical and nutritional characteristics of the soil before and after burning. The differences in the mean values of the fuel material variables and fire behavior parameters were statistically significant, being greater in the plots located in stacked fuels. In both types of plots, three months after burning, the mean values of soil characteristics, although lower and statistically different from those before the fire was applied, reached levels numerically similar, some higher in the case of dispersed fuels. The study provides information that, although limited by the short time used to make the measurements after burning, can be used for decision-making in the context of regulating the use of fire on forest vocation lands.

**KEYWORDS:** fire behaviour, fire management, combustible material, soil properties, controlled burning, fire uses.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos son uno de los recursos no renovables más valiosos de la Tierra. Son el soporte de la vegetación natural y de los agroecosistemas humanos, representan la mayor reserva de carbono orgánico terrestre y actúan como almacenes y filtros de agua. La humanidad ha afectado a los suelos desde sus inicios de muchas maneras diferentes, siendo la quema la primera perturbación humana a escala del paisaje (Santín y Doerr, 2016).

El uso del fuego por los productores agrícolas es una práctica común que ha sido utilizada desde tiempos inmemoriales en diferentes tipos de vegetación en la mayoría de los países del mundo (Seger et al., 2013; Ramos-Rodríguez et al., 2021). Esta práctica permite la gestión del territorio (regeneración de pastos, roturaciones, quema de rastrojos y residuos agrícolas) (Montiel Molina, 2013); cada vez más, se reconoce como un componente central de la gestión integrada de la tierra en lugares propensos a los incendios (Carroll et al., 2021), entre los cuales se encuentran las tierras de vocación forestal. Estas últimas, según Nascimento y Wiecheteck (2014), son las tierras que, por sus características físicas e inmutables en el corto plazo de topografía, erodabilidad del suelo y precipitación, llevan a que tales tierras estén bajo riesgo de erosión y escurrimiento superficial si no cuentan con una cobertura protectora.

Los agricultores usan la quema porque la consideran un medio práctico para varios propósitos, como clarear la tierra para eliminar los residuos de los cultivos, tener una mayor y más rápida disponibilidad de nutrientes en el suelo y, en consecuencia, aumentar su capacidad productiva. También el fuego permite la reducción de la incidencia de plagas y enfermedades, y de los gastos de mano de obra para eliminar la vegetación, disminuyendo así sus costos de producción, entre otros (Bonfim et al., 2003). Además, tras un incendio se produce un aumento de los nutrientes disponibles en el suelo, principalmente en forma de componentes hidrosolubles de la ceniza que quedan a disposición de los organismos vivos. El efecto "fertilizante"

del fuego se conoce desde los inicios de la agricultura y la silvicultura (Pyne, 2001).

Independientemente del uso generalizado del fuego, este afecta a ecosistemas enteros: su flora, su fauna, la atmósfera, el agua y el suelo (Doerr y Cerdà, 2005; Ferreira et al., 2008). El fuego puede afectar a las propiedades del suelo en función de una serie de factores, como la severidad del incendio y el tipo de suelo (Mataix-Solera et al., 2011), así como los valores que muestren las variables de su comportamiento tales como intensidad lineal, velocidad de propagación y calor liberado por unidad de área (Martínez-Becerra et al., 2004). Dichas afectaciones pueden llegar, en ocasiones, a desencadenar severos procesos de degradación (Galang et al., 2010; Redin et al., 2011; Hernández et al., 2013; White et al., 2017). La quema del humus resulta en la pérdida de materia orgánica y la reducción del contenido del nitrógeno por combustión de compuestos orgánicos y de sustancias nitrogenadas. Paralelamente a este hecho, se elimina la microfauna del suelo (organismos reductores) generadora del suelo agrícola, de aquellos organismos que transforman la materia orgánica en elementos inorgánicos útiles para el aprovechamiento por los productores (Gil Mora, 2020).

Los principales efectos del fuego en el suelo incluyen cambios en las propiedades físicas y químicas, principalmente en la materia orgánica, acidez o pH, afectaciones biológicas, estabilidad estructural, porosidad y modificaciones en los nutrientes totales del suelo (Rosero y Osorio, 2013). Otro efecto es la repelencia al agua, dependiendo de las interacciones combinadas de las propiedades del suelo y del régimen de calentamiento del suelo que se desarrolla durante un incendio (DeBano, 2003; Stavi, 2019). A su vez, la modificación de las propiedades físicoquímicas del suelo induce cambios en la abundancia y actividad microbiana (Panico et al., 2020) y puede producir efectos duraderos en la composición y dinámica de la materia orgánica (González-Pérez et al., 2004). Aunque durante una quema, según Soares et al. (2017), la temperatura en la superficie del suelo puede llegar a 200 °C o más, dependiendo de la inten-



sidad del fuego, debido al calor transferido por radiación; debajo de la superficie, las temperaturas dependen del calor conducido a través del suelo, y decrecen rápidamente con el aumento de la profundidad porque el suelo no es un buen conductor del calor.

En correspondencia con lo anterior, la quema prescrita aún no está plenamente aceptada en todo el mundo como herramienta de gestión. Muchos países ven el fuego como un riesgo más que como un recurso. De hecho, hasta que las pruebas técnicas y científicas apoyaron el uso del fuego como herramienta de gestión para los bosques y otros usos del suelo, casi todos los gobiernos mantuvieron esta opinión (Francos y Úbeda, 2021).

Existe una gran cantidad de investigaciones (Alcañiz et al., 2016; Akburak et al., 2018; Cavard et al., 2019; Chungu et al., 2020; Alexakis et al., 2021) y artículos de revisión (Certini, 2005; Alcañiz et al., 2018; Agbeshie et al., 2022) en el área de los efectos del fuego sobre el suelo en vegetación forestal, con la característica de que, en muchos casos, no se tiene información sobre el comportamiento del fuego, es decir, se utilizan áreas que ya han sido quemadas. Por el contrario, resulta más difícil encontrar información sobre los efectos del fuego en las características de los suelos y mucho menos teniendo en cuenta mediciones de los parámetros del comportamiento del fuego durante la quema tanto en tierras agrícolas en general, como de vocación forestal en particular.

Considerando estos antecedentes, para desarrollar esta investigación se planteó la hipótesis de que durante la quema de los residuos provenientes del cultivo de *Zea mays* L. apilados en hileras y dispersos en toda el área, se alcanzarían valores diferentes para los parámetros del comportamiento del fuego, lo que provocaría también efectos diferentes sobre las características del suelo. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para la toma de decisiones en el contexto de la regulación del uso del fuego en las tierras de vocación forestal.

## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos del fuego sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal en Jipijapa, Manabí, Ecuador.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caracterización del área de estudio

La investigación se realizó en tierras de vocación forestal utilizadas para el cultivo de *Zea mays* L. de la comunidad Andil, cantón Jipijapa, provincia Manabí, Ecuador (Fig. 1). Dicha comunidad se encuentra ubicada a 3.2 km del centro de la ciudad de Jipijapa, con una altitud media de 351.04 m. El clima de Jipijapa se clasifica como tropical, considerado Aw según la clasificación climática de Köppen-Geiger. Los valores medios anuales de temperatura y de precipitación son de 23.0 °C y 1486 mm, respectivamente (Climate-Data, 2022). En esta localidad, al igual que en muchas otras de Ecuador, los campesinos queman todos los años los residuos de la cosecha de maíz mezclados con vegetación herbácea con el fin de limpiar el terreno para la próxima siembra. En dependencia de la cantidad de combustibles, unas veces el mismo es apilado en hileras o rolos antes de ser quemado y otras los dejan dispersos sobre toda el área por quemar.

### Delimitación del área experimental y colecta de datos

Para el desarrollo de la investigación se utilizó un diseño no experimental transversal tipo descriptivo para el caso de la caracterización de las variables meteorológicas y de los combustibles, así como para la evaluación de los parámetros del comportamiento del fuego; mientras que, para el caso de los análisis de suelo, el diseño fue no experimental longitudinal tipo tendencia. Teniendo en cuenta las dos formas utilizadas por los campesinos para quemar, se

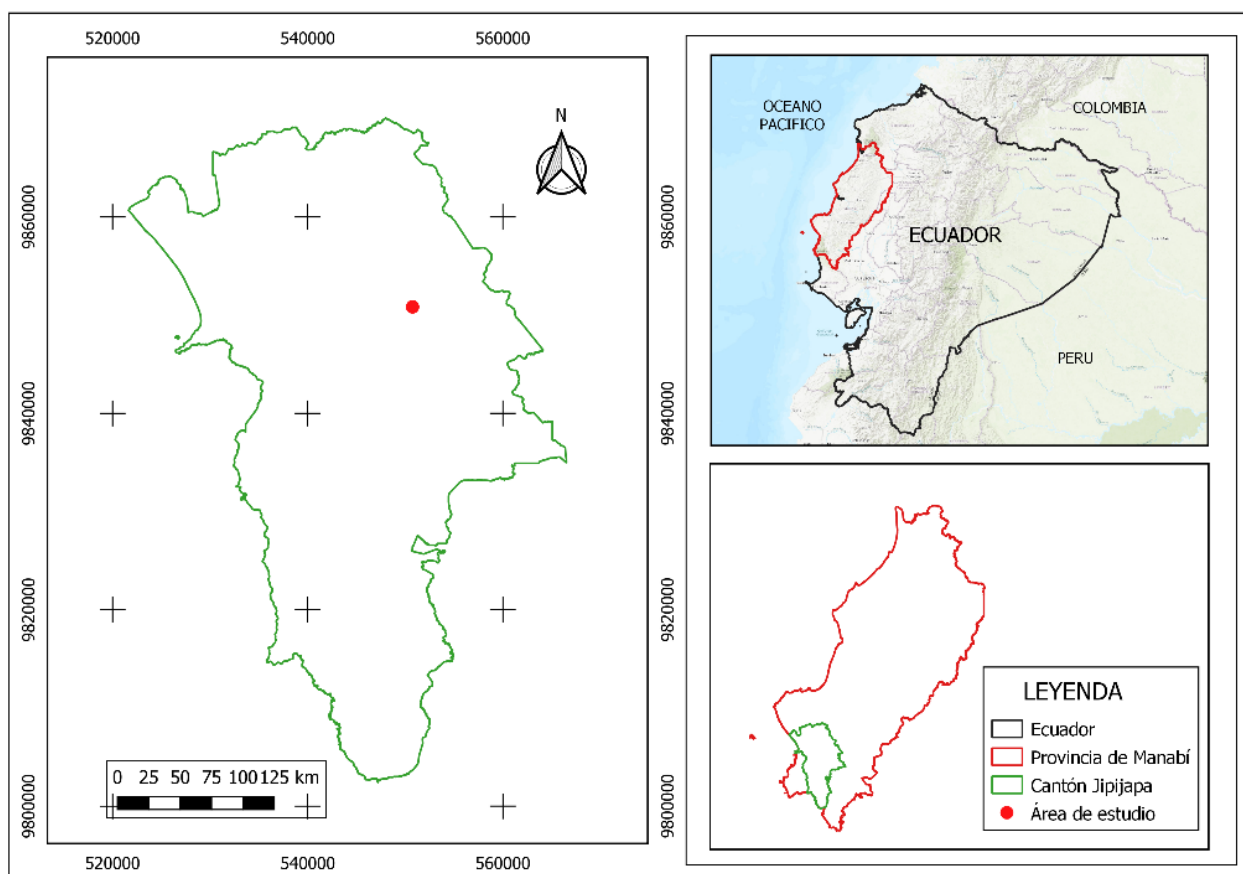


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio.



FIGURA 2. Combustibles apilados en hileras (izquierda) y dispersos en el área (derecha) antes de la quema.

delimitaron 10 parcelas de 5 m de largo y un ancho medio de 1.10 m, ubicadas una a continuación de la otra sobre dos hileras de combustibles y otras tres parcelas de 20 m  $\times$  50 m en un área donde los residuos se encontraban dispersos, es decir, habían sido cortados, pero no apilados (Fig. 2).

Alrededor de las tres parcelas se construyó un cortafuego de 1 m de ancho para evitar que el fuego pasara al área externa del tratamiento. Los restos de combustibles después de la quema se muestran en la figura 3.



FIGURA 3. Restos de combustibles en hileras (izquierda) y dispersos en el área (derecha) después de la quema.

### Caracterización de variables meteorológicas y de los combustibles

La caracterización de las variables meteorológicas se realizó a partir de mediciones de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante el desarrollo del experimento. Se utilizó en medidor meteorológico de bolsillo marca *Ambient weather* WM-4 de fabricación china. Se realizó una medición inmediatamente anterior a la quema, una cuando el fuego se encontraba en la mitad de la parcela y otra una vez que el fuego había llegado al final de esta. Estas mediciones se realizaron a 0.50 m de altura del suelo y a una distancia del combustible en llamas a la cual no llegaba el calor del fuego.

Para caracterizar el material combustible se obtuvieron informaciones antes de la quema sobre peso, grosor de la capa de combustible depositado sobre el suelo y contenido de humedad. La determinación del peso, cantidad de material combustible o materia seca antes de la quema se basó en el método destructivo propuesto por Cruz et al. (2020). De acuerdo con esto, en el centro de cada parcela ubicada en la hilera de combustible se colectó una muestra de 2500 cm<sup>2</sup> delimitada por un cuadro de madera de 50 cm × 50 cm, de cuyo interior se retiró todo el material. En el caso de las parcelas de 20 m × 50 m la muestra fue de 1 m<sup>2</sup>. El material se separó en: a) miscelánea, entendiéndose como tal a los materiales no leñosos muertos tales como hojas, humus y frutos y b) los tallos de las plantas de maíz y de herbáceas con diámetros superiores a 0.7 cm. El

material colectado en cada parcela fue pesado con balanza de gancho de 0.01 g de precisión, tomándose del mismo una muestra de aproximadamente 80 g la cual se colocó en fundas de plástico de cierre hermético para ser trasladadas al Laboratorio de Bromatología de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, donde se colocaron muestras de 50 g en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante. El día de la quema se volvió a determinar la humedad del combustible, pero esta vez solo se tomó una muestra aproximada de 500 g de combustible en cada tipo de parcela la cual fue colocada en fundas de plástico de cierre hermético y trasladadas al laboratorio, en el que se colocaron cinco muestras de 50 g cada una por tipo de parcela en estufa. En estudios similares Seger et al. (2013) utilizaron en vegetación de estepa gramíneo-leñosa 20 parcelas con dimensiones de 3 m × 20 m (60 m<sup>2</sup>) tomando tres muestras de 400 cm<sup>2</sup> (20 cm × 20 cm) cada una. En cultivo de trigo Cruz et al. (2020) utilizaron parcelas de 60 m × 60 m. En pastizal Rodríguez-Trejo et al. (2020) establecieron seis parcelas rectangulares de 20 m × 30 m utilizando para el muestreo cuadros de 30 cm × 30 cm y de 1 m<sup>2</sup>.

La humedad de los combustibles tanto para estimar su peso seco en cada parcela como el día de la quema fue determinada a través de la ecuación 1 (Souza et al., 2023).

$$U = \frac{MU-MS}{MS} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:

$U$  = contenido de humedad del combustible (%)

$MU$  = masa húmeda del material en el momento de la recolección (g)

$MS$  = masa seca del material después de ser puesta en la estufa (g)

El grosor de la capa de combustible depositado sobre el suelo antes de la quema, medida en cm, se determinó a través de tres mediciones realizadas en los extremos y en el centro de cada parcela de 5 m de longitud ubicada en las hileras de combustibles y 10 mediciones realizadas cada 5 m siguiendo una línea en el centro de las parcelas de 20 m  $\times$  50 m.

### Evaluación de parámetros del comportamiento del fuego

La evaluación del comportamiento del fuego durante el experimento se basó en la medición de los parámetros altura de las llamas, velocidad de propagación, intensidad lineal del fuego, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área. La altura de las llamas se midió en cada parcela con una baliza graduada a los 2 m y 4 m del extremo por donde se inició la quema, es decir, dos mediciones en cada parcela ubicada en las hileras de combustible; y 10 mediciones en las parcelas de 20 m  $\times$  50 m, es decir, cada 5 m. La velocidad de propagación del fuego ( $\text{m s}^{-1}$ ) se determinó midiendo el tiempo utilizado por el fuego para recorrer cada parcela considerando esto cuando 50% de la línea de fuego llegó al final de la parcela.

La intensidad lineal del fuego (Byram, 1959), la altura de secado letal (Wagner, 1973) y el calor desprendido por unidad de área se estimaron según se citó en Soares et al. (2017) a través de las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente.

$$I = H \cdot W \cdot r \quad (2)$$

$$h_s = \frac{3.94 I^{7/6}}{(0.107 I + V^3)^{1/2} (60 - T)} \quad (3)$$

$$Ha = \frac{I}{r} \quad (4)$$

donde:

$I$  = intensidad lineal del fuego ( $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )

$H$  = calor de combustión ( $\pm 4000 \text{ kcal kg}^{-1}$ )

$w$  = peso del combustible disponible o peso seco ( $\text{kg m}^{-2}$ )

$r$  = velocidad de propagación del fuego ( $\text{m s}^{-1}$ )

$h_s$  = altura de secado letal (m)

$V$  = velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )

$T$  = temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Ha$  = calor liberado por unidad de área ( $\text{kcal m}^{-2}$ )

La constante 60, asociada a la temperatura del aire, representa aproximadamente la temperatura letal del follaje de los árboles.

El calor de combustión del material húmedo se calculó a través de la ecuación 5 (Soares et al., 2017). Se consideró un calor de combustión seco de  $16\,720 \text{ kJ kg}^{-1}$  ( $4000 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) el cual utilizaron Ramos Rodríguez et al. (2018, 2019), estando en el intervalo de las determinaciones hechas por Londe de Camargos et al. (2015), quienes obtuvieron valores de poder calorífico seco entre  $17\,136.63 \text{ kJ kg}^{-1}$  y  $19\,355.65 \text{ kJ kg}^{-1}$  ( $4093 \text{ kcal kg}^{-1}$  y  $4623 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) en un bosque estacional semidesiduo. Fidelis et al. (2010) utilizaron en pastizales subtropicales un valor de  $15\,500 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Batista et al. (2013) utilizaron en quemas experimentales en *Pinus elliottii* un valor medio de  $15\,490 \text{ kJ kg}^{-1}$  de acuerdo con determinaciones hechas por Soares y Hakkila (1987).

$$I = H \cdot W \cdot r \quad (5)$$

donde:

$Hw$  = calor de combustión del material húmedo

$Hd$  = calor de combustión del material seco

$U$  = contenido de humedad del material combustible (%)

### Análisis de las características físicas, químicas y nutricionales del suelo

Para el análisis de las características físicas, químicas y nutricionales del suelo se colectaron cinco muestras de suelo de aproximadamente 100 g cada una a profundidades de 0 cm a 20 cm en cada tipo de parcela de quema. El muestreo se realizó cinco días antes de aplicar el fuego,

así como siete días y tres meses después de la quema correspondiendo esto a las fechas 25/11/2019, 8/12/2019 y 1/03/2020, respectivamente, para el caso de las parcelas ubicadas en hileras de combustibles, mientras que en las parcelas ubicadas en combustibles dispersos el muestreo se realizó en las fechas 2/12/2019, 15/12/2019 y 8/03/2020. El análisis de las muestras de suelo se realizó en el Laboratorio de Suelos, Foliares y Agua, el cual está acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) con acreditación N° SAE-LEN-16-006. Se evaluaron las características físicas: porcentaje de arena, limo y arcilla por el método de Bouyoucos, mientras que la clase textural se obtuvo por cálculos; las químicas: materia orgánica por el método volumétrico, pH por el método electrométrico y capacidad de intercambio catiónico por cálculo; mientras que las nutricionales: nitrógeno por el método volumétrico; fósforo por el método colorimétrico; potasio, calcio, magnesio, manganeso y cobre por el método de absorción atómica.

Procesamiento estadístico

El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS *Statistics for Windows* (version 22.0) (IBM Corp., 2013). Se trabajó con un nivel de significancia del 0.05 ( $P = 0.05$ ). La normalidad de los datos fue verificada con la prueba esta-

dística de Shapiro-Wilks y la homogeneidad de la varianza con el estadístico de Levene. En todos los casos, cuando los datos se ajustaron a la distribución normal la diferencia entre dos medias se analizó con la prueba estadística  $t$  de Student y entre tres medias con un análisis de varianza; cuando ocurrió lo contrario, se utilizó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney para dos medias y la prueba de Kruskal-Wallis para tres medias. La comparación de medias se hizo de acuerdo con las pruebas de Tukey y Dunn para el análisis de varianza y la prueba de Kruskal-Wallis, respectivamente.

RESULTADOS

Condiciones meteorológicas el día de la quema

Los valores medios de las variables meteorológicas consideradas en el experimento mostraron, a través de la prueba estadística no paramétrica U de Mann-Whitney, que no fueron diferentes para la temperatura del aire ( $Z = -1.787$ ;  $p = 0.074$ ) los días en que se quemaron las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles y las ubicadas en áreas de combustibles dispersos, lo cual no fue así para el caso de la humedad relativa ( $Z = -2.542$ ;  $p = 0.011$ ) y de la velocidad del viento ( $Z = -2.616$ ;  $p = 0.009$ ) cuyos valores medios sí fueron diferentes (Tabla 1).

TABLA 1. Valores medios de las variables meteorológicas el día de la quema en cada tipo de parcela.

<i>Distribución del combustible</i>	<i>N</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Hr (%)</i>	<i>Vv (m s<sup>-1</sup>)</i>
		<i>(media ± de)</i>	<i>(media ± de)</i>	<i>(media ± de)</i>
Apilado en hileras	10	28.2 ± 0.84 a	72.3 ± 4.80 a	0.4 ± 0.17 a
Disperso en el área	3	29.5 ± 1.00 a	64.3 ± 1.02 b	0.8 ± 0.05 b

a-b medias en las columnas con la misma letra indican diferencias estadísticas no significativas ( $P < 0.05$ ). N: cantidad de parcelas; T: temperatura del aire; Hr: humedad relativa; Vv: velocidad del viento; ± de: desviación estándar.



### Caracterización de los combustibles

El día de la quema, la humedad de los combustibles en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles y en el área de combustibles dispersos fue de 13.05% y 11.77%, respectivamente. Se obtuvieron mayores valores medios para las variables peso del material combustible seco y grosor de la capa de combustible en las parcelas ubicadas en las hileras. La prueba *t* de Student demostró la existencia de diferencia estadística significativa para el caso del peso ( $t = 3.778$ ;  $p = 0.03$ ) y para el grosor ( $t = 7.284$ ;  $p = 1.6 \times 10^{-5}$ ). Además, según los valores obtenidos para la desviación estándar en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles, fue mayor la dispersión de los datos con respecto a la media (Tabla 2).

### Parámetros del comportamiento del fuego

La evaluación de los parámetros del comportamiento del fuego en los diferentes tipos de parcelas (Tabla 3) mostró

valores medios aritméticamente superiores para todos los parámetros en las parcelas ubicadas en las hileras de combustible, excepto para el caso de la velocidad de propagación. No obstante, las pruebas estadísticas correspondientes dieron por resultado valores medios similares para el caso de la intensidad lineal del fuego ( $t = 0.685$ ;  $p = 0.508$ ) y la altura de secado letal ( $t = 0.472$ ;  $p = 0.646$ ), siendo diferentes para la altura de llama ( $Z = -2.370$ ;  $p = 0.018$ ), la velocidad de propagación del fuego ( $t = -4.161$ ;  $p = 0.002$ ) y el calor liberado por unidad de área ( $t = 3.744$ ;  $p = 0.003$ ). También en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles los valores de la desviación estándar obtenidos para cada variable, con excepción de la velocidad de propagación que fueron similares, indicando mayor dispersión de los datos con respecto a la media, lo cual supone un comportamiento del fuego menos homogéneo en sentido general.

TABLA 2. Valores medios de las características del combustible antes de la quema en cada tipo de parcela.

<i>Distribución del combustible</i>	<i>N</i>	<i>PcA</i> ( <i>kg m<sup>-2</sup></i> )	<i>EspA</i> ( <i>cm</i> )
		( <i>media ± de</i> )	( <i>media ± de</i> )
Apilado en hileras	10	2.49 ± 0.66 a	35.93 ± 5.18 a
Disperso en el área	3	0.99 ± 0.13 b	12.66 ± 2.95 b

a-b medias en las columnas con la misma letra indican diferencias estadísticas no significativas ( $P < 0.05$ ). N: cantidad de parcelas; PcA: peso del material combustible seco antes de la quema; EspA: grosor de la capa de combustible antes de la quema; de: desviación estándar.

TABLA 3. Valores medios de los parámetros del comportamiento del fuego en cada tipo de parcela.

<i>Distribución del combustible</i>	<i>N</i>	<i>Hll</i> ( <i>m</i> )	<i>Vpf</i> ( <i>m s<sup>-1</sup></i> )	<i>I</i> ( <i>kcal m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup></i> )	<i>hs</i> ( <i>m</i> )	<i>Ha</i> ( <i>kcal m<sup>-2</sup></i> )
		( <i>media ± de</i> )	( <i>media ± de</i> )	( <i>media ± de</i> )	( <i>media ± de</i> )	( <i>media ± de</i> )
Apilado en hileras	10	1.06 ± 0.25 a	0.0138 ± 0.0050 a	121.23 ± 62.39 a	9.04 ± 2.80 a	8663.37 ± 2306.99 a
Disperso en el área	3	0.50 ± 0.10 b	0.0279 ± 0.0054 b	95.75 ± 7.67 a	8.25 ± 0.23 a	3495.15 ± 479.00 b

a-b medias en las columnas con la misma letra indican diferencias estadísticas no significativas ( $P < 0.05$ ). N: cantidad de parcelas; Hll: altura de las llamas; Vpf: velocidad de propagación del fuego; I: intensidad lineal del fuego; hs: altura de secado letal; Ha: calor liberado por unidad de área; de: desviación estándar.





## Características físicas, químicas y nutricionales del suelo

El análisis de las características físicas del suelo puso de manifiesto que, a pesar de que las parcelas de quema ubicadas en hileras y en combustibles dispersos estaban separadas por una distancia de 20 m, los porcentajes de arena y arcilla eran estadísticamente diferentes antes de quemar, no ocurriendo lo mismo para el caso del limo. Siete días después de la quema se obtuvieron diferencias para los tres parámetros, pero a los tres meses el comportamiento fue similar a lo observado cinco días antes de quemar. No obstante, de forma general los valores medios fueron diferentes en cada tipo de parcela considerando los tres momentos en que se tomaron las muestras, aunque, para el caso de las parcelas en hileras, los valores medios para la arena fueron similares antes de quemar y tres meses después de la quema. Comportamiento similar se observó para el caso del limo en las parcelas ubicadas en combustibles dispersos. En el caso de las características químicas, se obtuvo diferencia significativa entre las medias de los tres parámetros analizados entre los tipos de parcelas en los tres momentos en que se realizó la toma de muestras. También fueron diferentes las medias de un mismo parámetro considerando dichos momentos, excepto para el caso del pH en las parcelas ubicadas en hileras cuyos valores medios fueron similares siete días y tres meses posteriores a la quema, siendo diferentes en ambos casos con el valor obtenido antes de quemar. Con respecto a las características nutricionales se obtuvieron diferencias significativas para los valores medios de todos los parámetros en los dos tipos de parcelas para los tres momentos de la toma de muestras, excepto para el nitrógeno, caso en el cual no hubo diferencias tres meses después de la quema. Los valores medios obtenidos cinco días antes de la quema, así como siete días después, fueron significativamente diferentes para todos los parámetros. Los valores medios también fueron estadísticamente diferentes tres meses después de la quema con respecto a los valores encontrados antes de quemar, excepto para el cobre en las parcelas ubicadas en hileras de combustibles cuyas medias fueron similares (Tabla 4).

## DISCUSIÓN

El día que se realizó la quema en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles, las condiciones meteorológicas fueron menos estables, según indican los valores obtenidos para la desviación estándar, los cuales muestran mayor dispersión de los datos con respecto a la media para ese día. Durante el desarrollo del experimento, se observó poca variación de los valores de las variables temperatura del aire y humedad relativa, expresado esto en los bajos valores de la desviación estándar, no ocurriendo lo mismo para el caso del viento. Este comportamiento coincide con lo observado por Ramos Rodríguez et al. (2019) durante la realización de una quema a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. en el cantón Jipijapa, Manabí, Ecuador. También se obtuvo que los días de la quema la temperatura del aire fue similar, siendo diferentes los valores para el resto de las variables. Esto no coincide con lo registrado por Seger et al. (2013) durante quemas prescritas realizadas en vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, caso en el cual solo los valores de la humedad relativa fueron similares los tres días de quema. Según Soares et al. (2017), constatada la necesidad de quemar, se debe procurar hacer la quema en días en que las condiciones sean favorables: velocidad del viento entre 5 km h<sup>-1</sup> y 15 km h<sup>-1</sup>, humedad relativa entre 50% y 60% y temperatura del aire entre 15 °C y 25 °C. El día de las quemas solo los valores de la velocidad del viento estuvieron por debajo de los indicados por estos autores. Por su parte Rodríguez-Trejo et al. (2020) realizaron quemas en Chiapas, México, en pastizales y en sabanas a favor del viento con valores medios de velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa de 7.7 km h<sup>-1</sup>, 24.3 °C y 64.7%, respectivamente. Durante el desarrollo de quemas experimentales en el Páramo Andino al sur de Ecuador, Carrión-Paladines et al. (2023) registraron valores medios de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento de 15.6 °C, 72.6% y 8.9 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, los cuales no coinciden con los observados en esta investigación, con excepción de la humedad relativa el día de la quema de las parcelas ubicadas en hileras de combustibles.

Tabla 4. Valores medios  $\pm$  desviación estándar de los parámetros del suelo analizados antes y después de aplicar el fuego en parcelas de combustibles apilados en hileras y dispersos.

Parámetros analizados	Distribución de los combustibles	Momentos de la toma de muestras		
		conco días antes de la quema	siete días después de la quema	tres meses después de la quema
Características físicas				
Arena (%)	En hileras	28 ± 1.22 <sup>a(a)</sup>	26 ± 1.00 <sup>a(b)</sup>	28 ± 1.00 <sup>a(a)</sup>
	Dispersos	22 ± 1.00 <sup>b(a)</sup>	30 ± 1.00 <sup>b(b)</sup>	20 ± 1.22 <sup>b(c)</sup>
Limo (%)	En hileras	32 ± 0.70 <sup>a(a)</sup>	36 ± 1.00 <sup>a(b)</sup>	30 ± 1.58 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	32 ± 1.00 <sup>a(a)</sup>	30 ± 1.58 <sup>b(ab)</sup>	28 ± 1.58 <sup>a(ab)</sup>
Arcilla (%)	En hileras	40 ± 1.00 <sup>a(a)</sup>	38 ± 1.00 <sup>a(b)</sup>	42 ± 1.00 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	46 ± 1.00 <sup>b(a)</sup>	40 ± 1.00 <sup>b(b)</sup>	52 ± 1.00 <sup>b(c)</sup>
Clase textural	En hileras	Arcilla	Franco arcilloso	Arcilla
	Dispersos	Arcilla	Arcilla	Arcilla
Características químicas				
pH (a 25 °C)	En hileras	7.41 ± 0.01 <sup>a(a)</sup>	7.19 ± 0.01 <sup>a(b)</sup>	7.20 ± 0.01 <sup>a(b)</sup>
	Dispersos	7.10 ± 0.01 <sup>b(a)</sup>	7.13 ± 0.01 <sup>b(b)</sup>	7.17 ± 0.01 <sup>b(c)</sup>
CIC (cmol/kg)	En hileras	30.49 ± 0.00 <sup>a*(a)</sup>	25.11 ± 0.02 <sup>a(b)</sup>	28.92 ± 0.01 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	32.29 ± 0.01 <sup>b*(a)</sup>	26.71 ± 0.01 <sup>b(b)</sup>	33.73 ± 0.01 <sup>b(c)</sup>
Materia orgánica (%)	En hileras	5.24 ± 0.03 <sup>a(a)</sup>	3.05 ± 0.02 <sup>a(b)</sup>	3.96 ± 0.73 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	4.64 ± 0.03 <sup>b(a)</sup>	3.36 ± 0.01 <sup>b(b)</sup>	3.86 ± 0.24 <sup>b(c)</sup>
Características nutricionales				
Nitrógeno (%)	En hileras	0.26 ± 0.00 <sup>a*(a*)</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>a(b*)</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>a(c*)</sup>
	Dispersos	0.23 ± 0.01 <sup>b*(a)</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>b(b)</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>a(b)</sup>
Fósforo (mg/kg)	En hileras	65.1 ± 0.79 <sup>a(a)</sup>	20.0 ± 1.00 <sup>a*(b)</sup>	22.6 ± 0.31 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	24.6 ± 0.14 <sup>b(a)</sup>	34.7 ± 0.15 <sup>b*(b)</sup>	43.5 ± 0.15 <sup>b(c)</sup>
Potasio (cmol/kg)	En hileras	1.99 ± 0.07 <sup>a*(a*)</sup>	1.06 ± 0.06 <sup>a*(b*)</sup>	1.18 ± 0.02 <sup>a(c*)</sup>
	Dispersos	1.32 ± 0.01 <sup>b*(a)</sup>	1.18 ± 0.01 <sup>b*(b)</sup>	1.59 ± 0.01 <sup>b(c)</sup>
Calcio (cmol/kg)	En hileras	20.85 ± 0.06 <sup>a(a)</sup>	17.43 ± 0.05 <sup>a*(b)</sup>	17.98 ± 0.08 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	22.04 ± 0.02 <sup>b(a)</sup>	17.06 ± 0.01 <sup>b*(b)</sup>	17.71 ± 0.02 <sup>b(c)</sup>
Magnesio (cmol/kg)	En hileras	3.38 ± 0.02 <sup>a(a)</sup>	2.18 ± 0.01 <sup>a(b)</sup>	2.33 ± 0.02 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	2.36 ± 0.01 <sup>b(a)</sup>	3.13 ± 0.00 <sup>b(b)</sup>	3.25 ± 0.01 <sup>b(c)</sup>
Manganeso (mg/kg)	En hileras	12.06 ± 0.02 <sup>a(a)</sup>	2.29 ± 0.01 <sup>a(b)</sup>	6.15 ± 0.02 <sup>a(c)</sup>
	Dispersos	7.09 ± 0.01 <sup>b(a)</sup>	2.66 ± 0.02 <sup>b(b)</sup>	7.81 ± 0.01 <sup>b(c)</sup>
Cobre (mg/kg)	En hileras	2.22 ± 0.01 <sup>a(a)</sup>	2.80 ± 0.04 <sup>a(b)</sup>	2.18 ± 0.03 <sup>a(a)</sup>
	Dispersos	2.10 ± 0.02 <sup>b(a)</sup>	2.43 ± 0.02 <sup>b(b)</sup>	2.24 ± 0.02 <sup>b(c)</sup>

CIC: capacidad de intercambio catiónico. a-b medias en las columnas con la misma letra indican diferencias estadísticas no significativas ( $P < 0.05$ ). (a-c) medias en las filas con la misma letra entre paréntesis indican diferencias estadísticas no significativas ( $P < 0.05$ ). La comparación de medias es de acuerdo con las pruebas de Dunn (\*) y Tukey.



La cantidad de material combustible es importante para la propagación y la intensidad del fuego (Sağlam et al., 2008), siendo un factor importante en planes de prevención y control de incendios (Soares et al., 2017). Los valores obtenidos para la desviación estándar indican la presencia de un combustible distribuido menos homogéneamente en las parcelas ubicadas en hileras que en las ubicadas en las áreas de combustibles dispersos.

En el experimento, el peso del material combustible antes de la quema fue de  $2.49 \text{ kg m}^{-2}$  en las parcelas de combustibles apilados en hileras y  $0.99 \text{ kg m}^{-2}$  en las que estos estaban dispersos. Estos valores son superiores a los señalados en Chiapas, México, por Rodríguez-Trejo et al. (2020) en pastizales ( $0.62 \text{ kg m}^{-2}$ ) y en sabanas ( $1.41 \text{ kg m}^{-2}$ ) para el caso de los combustibles apilados. En vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, Seger et al. (2013) obtuvieron cargas de combustibles de  $2.26 \text{ kg m}^{-2}$ , valor similar a los obtenidos en este trabajo para el caso de las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles ( $2.49 \text{ kg m}^{-2}$ ). Sağlam et al. (2008) estimaron en vegetación arbustiva de Turquía cantidades medias de biomasa superiores ( $3.33 \text{ kg m}^{-2}$ ) y Cruz et al. (2020) reportaron en trigo (*Triticum* spp.) sin cosechar una carga media de combustible inferior ( $0.53 \text{ kg m}^{-2}$ ) a las observadas en esta investigación. En el Páramo Andino, Carrión-Paladines et al. (2023) estimaron un peso seco de  $1.79 \text{ kg m}^{-2}$ , valor intermedio entre los registrados en esta investigación para los dos tipos de parcelas considerados en el análisis.

Otro elemento que debe considerarse durante las quemas es la humedad del material combustible. En esta investigación, se obtuvieron valores promedio de 13.05% en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles y 11.77% en el área de combustibles dispersos. Según Soares et al. (2017), si la quema fuera realizada con el objetivo de limpieza del terreno, usando el fuego para eliminar restos de cultivos anteriores o área de desmonte, es recomendable que ese material esté bien seco, con 10% a 15% de humedad y distribuido por el área homogéneamente, sin amontonar, para propiciar una quema superficial y rápida y no provocar calentamiento prolongado al suelo. Los valores de humedad del combustible en los dos tipos de parcelas el día

de la quema estuvieron dentro del intervalo indicado por los autores anteriores. No obstante, en vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, Seger et al. (2013) quemaron con humedades de combustible de 50.33% y 50.58%; mientras que Cruz et al. (2020) aplicaron el fuego en parcelas de trigo (*Triticum* spp.) sin cosechar con un valor medio de humedad de 7.8% y Carrión-Paladines et al. (2023) quemaron en el Páramo Andino con una humedad del combustible de 23.6%.

Aunque estadísticamente no todos los valores de los parámetros utilizados para analizar el comportamiento del fuego fueron iguales en los dos tipos de parcelas (combustibles apilados y dispersos) numéricamente siempre fueron mayores para el caso de los combustibles apilados. Los valores medios de la intensidad del fuego fueron de  $121.23 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $95.75 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  en las parcelas de combustibles apilados y en las que estos estaban dispersos, respectivamente. Estos valores son inferiores a las  $132 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , valor sugerido por Soares et al. (2017) para no causar daños significativos a los árboles de coníferas. Los valores medios obtenidos en esta investigación por lo general coinciden con los publicados por Julio y Giroz (1975) para diversos experimentos de quemas controladas en plantaciones de diferentes especies en Valdivia, Chile, variando la intensidad del fuego en estas quemas entre  $77 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $289 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  para *Ulex* sp.; entre  $18.5 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $42.4 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  en *Pinus radiata* mezclado con zarzamora; entre  $155 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $447 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  en restos de explotación de *P. radiata* (ocho meses) mezclado con murra; siendo inferiores al valor medio de  $176.12 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  registrado durante la realización de quemas controladas en vegetación de campo en Paraná, Brasil, por Álvaro et al. (2011). En quemas controladas en vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, Seger et al. (2013) obtuvieron valores medios de intensidad lineal del fuego de  $50.68 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $210.53 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  al quemar en contra y a favor del viento, respectivamente. Weise et al. (2016) utilizando una cama de combustibles procedentes de un chaparral natural obtuvieron en laboratorio una intensidad lineal del fuego entre  $16.25 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y  $549.11 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Cruz et al. (2020) en parcelas de trigo (*Triticum* spp.) sin cosechar

registraron una intensidad media de  $4632.94 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , valor muy superior al documentado por todos los autores anteriores.

Durante el experimento se obtuvieron alturas medias de llama de 1.06 m en los combustibles apilados y de 0.50 m en los dispersos. Weise et al. (2016) utilizando una cama de combustibles procedentes de un chaparral natural obtuvieron en laboratorio una longitud de la llama entre 0.54 m y 2.80 m. Rodríguez-Trejo et al. (2020) durante quemas realizadas en Chiapas, México, obtuvieron en pastizales alturas de llama de 3.92 m y 1.07 m a favor y en contra del viento, respectivamente y en sabanas valores medios de 5.89 m y 2.21 m a favor y en contra del viento, respectivamente. En quemas controladas en vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, Seger et al. (2013) observaron valores medios de altura de llama de 0.84 m y 1.34 m al quemar en contra y a favor del viento, respectivamente. La altura media en quemas en el Páramo Andino en contra y a favor del viento fueron de 0.49 m y 0.71 m, respectivamente (Carrión-Paladines et al., 2023), valores similares a los obtenidos en este trabajo para las parcelas ubicadas en combustibles dispersos e inferiores a las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles.

La velocidad media de propagación del fuego obtenida fue de  $0.014 \text{ m s}^{-1}$  y  $0.028 \text{ m s}^{-1}$  en los combustibles apilados y en los dispersos, respectivamente. Rodríguez-Trejo et al. (2020) durante quemas realizadas en Chiapas, México, obtuvieron en pastizales velocidades de propagación de  $0.371 \text{ m s}^{-1}$  y  $0.011 \text{ m s}^{-1}$  a favor y en contra del viento, respectivamente y en sabanas valores medios de  $0.758 \text{ m s}^{-1}$  y  $0.046 \text{ m s}^{-1}$  a favor y en contra del viento, respectivamente. En quemas controladas en vegetación de estepa de gramíneas bajas en Paraná, Brasil, Seger et al. (2013) registraron valores medios de velocidad de propagación de  $0.012 \text{ m s}^{-1}$  y  $0.049 \text{ m s}^{-1}$  al quemar en contra y a favor del viento, respectivamente. Álvaro et al. (2011) documentó una velocidad media de propagación del fuego de  $0.022 \text{ m s}^{-1}$  durante la realización de quemas controladas en vegetación de campo en Paraná, Brasil. Por su parte Carrión-Paladines et al. (2023) estimaron en el Páramo Andino velocidades de propagación del fuego en

contra y favor del viento de  $0.011 \text{ m s}^{-1}$  a  $0.016 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente, valores similares a los estimados en esta investigación para la quema de los combustibles apilados en hileras, pero inferiores a los obtenidos al quemar en los combustibles dispersos.

El fuego introduce efectos negativos y positivos sobre las características de los suelos. La magnitud de estos efectos depende fundamentalmente de los valores que muestren variables del comportamiento del fuego tales como intensidad lineal, velocidad de propagación y calor liberado por unidad de área. Las magnitudes de estas variables dependerán de factores como el combustible, la topografía y el tiempo atmosférico (Martínez-Becerra et al., 2004).

El fuego puede afectar significativamente propiedades físicas, químicas y biológicas de la capa superficial del suelo que son esenciales para el mantenimiento de la productividad forestal a largo plazo. El fuego altera asimismo el ciclo de nutrientes, ya que la combustión del mantillo y la materia orgánica incrementan la disponibilidad de algunos nutrientes mientras otros son volatilizados. En ausencia de fuego, los nutrientes contenidos en la madera muerta y en la materia orgánica del suelo son reciclados por el proceso de descomposición biológica, en ambientes donde la temperatura raramente alcanza los  $38^\circ\text{C}$  y hay suficiente humedad como para sostener la actividad microbiana. Bajo estas condiciones, los microorganismos del suelo descomponen la materia orgánica lentamente y a lo largo del tiempo, liberando de esa manera los nutrientes esenciales. En contraste, durante un evento de fuego, los nutrientes almacenados en el material combustible y la materia orgánica del suelo están sujetos a un calentamiento severo y sometidos a varias transformaciones irreversibles durante la combustión (Martínez-Becerra et al., 2004).

El valor del pH de los suelos es una característica muy importante, ya que de esta propiedad dependen una serie de funciones que tienen relación con los cultivos, como por ejemplo la asimilación de nutrientes, el desarrollo de la microflora y la generación de iones que pueden resultar tóxicos para las plantas, como el aluminio (Bernal et al., 2015). El pH del suelo es una de las propiedades químicas



que se ven afectadas tras el paso del fuego. Su valor se incrementa debido a las cenizas procedentes del incendio, las cuales contienen gran cantidad de carbonato potásico ( $\text{CO}_3\text{K}_2$ ), que, por proceder de un ácido débil y una base fuerte, presenta reacción básica cuando se hidroliza, y por consiguiente se incrementa el pH. Sin embargo, cuando los efectos del lavado y arrastre de cationes por las lluvias son muy intensos, a los incrementos iniciales de pH tras el fuego pueden seguir fuertes descensos que logran alcanzar valores inferiores a los registrados antes del incendio o la quema (Rosero y Osorio, 2013). Cuando la materia orgánica del suelo es quemada, las sustancias netas contenidas son liberadas en forma de óxidos o carbonatos, que generalmente presentan reacción alcalina. De ese modo, parece lógico admitir que cuando considerables cantidades de cenizas son depositadas en el suelo, la tendencia es a disminuir su acidez (Soares et al., 2017). El pH suele aumentar en suelos quemados por fuego prescrito debido al aporte de cationes procedente de las cenizas, aunque dependiendo de la intensidad de la quema y otras características edáficas, puede no haber cambios apreciables (Vega et al., 2000).

Lo anterior fundamenta los resultados obtenidos en esta investigación los cuales indican que en los combustibles apilados los valores de pH disminuyeron ligeramente mientras que, en los combustibles dispersos, ocurrió lo contrario, independientemente de lo cual no hubo cambios significativos en la acidez del suelo debido a la quema, resultado que coincide con lo hallado por Batista et al. (1997) durante la realización de quemas controladas en plantaciones de *Pinus taeda* en Paraná, Brasil. Alva (2019) obtuvo un valor de pH ligeramente superior en suelos afectados por el fuego con respecto a los no afectados en Pagaibamba, Perú.

En esta investigación, el porcentaje de materia orgánica disminuyó en los dos tipos de parcelas lo cual coincide con Álvaro et al. (2011) quienes obtuvieron durante la aplicación de quemas controladas en vegetación de campo que el contenido de materia orgánica en el suelo sometido a la acción del fuego se redujo aproximadamente 14%. También Alva (2019) mencionó valores inferiores

para el porcentaje de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en suelos afectados por el fuego en Pagaibamba, Perú. No obstante, Batista et al. (1997) encontraron que la quema en plantaciones de *Pinus taeda* no provocó alteraciones estadísticamente significativas en los valores medios de los contenidos de materia orgánica y de la capacidad de intercambio catiónico, observándose un ligero incremento para el caso de la materia orgánica hasta los 10 cm de profundidad.

Las cantidades de la mayoría de macro y micronutrientes disminuyeron ligeramente después de la quema en el caso de los combustibles apilados, lo cual no fue tan marcado para el caso de los combustibles dispersos. Contrario a esto, Batista et al. (1997), considerando los resultados encontrados después de quemas controladas en plantaciones de *Pinus taeda* afirmaron que no hubo diferencia significativa en los contenidos de cationes intercambiables  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{P}$  en las camadas superficiales del suelo de áreas quemadas y no quemadas. No obstante, todos los elementos analizados mostraron contenidos ligeramente superiores en las parcelas quemadas. También Álvaro et al. (2011) verificaron un aumento del potasio y del sodio después de aplicar quemas controladas en vegetación de campo y Nghalipo et al. (2018), al analizar el efecto del fuego en una zona de sabana en Namibia, obtuvieron que los contenidos de  $\text{P}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  aumentan inmediatamente después del incendio debido a su presencia en la ceniza depositada en el suelo tras la quema y disminuyen constantemente con el paso del tiempo. En Pagaibamba, Perú, Alva (2019) observó que en el suelo afectado por el fuego fueron menores los valores para el  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{N}^{3-}$  y mayores los de  $\text{P}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en los primeros 10 cm con respecto al suelo no afectado.

En esta investigación se obtuvo un ligero aumento del porcentaje de arcilla en ambos tipos de parcelas después de tres meses de efectuada la quema. Este resultado no coincide con el de Alva (2019) pues el porcentaje de limo fue muy superior en el suelo quemado con respecto al no quemado en Pagaibamba, Perú. Tal vez esto se deba al arrastre producido por la lluvia pues, de acuerdo con Beyers

et al. (2005), los componentes de la textura del suelo (arena, limo y arcilla) presentan altos umbrales de temperatura y por lo general el fuego no los afecta, a menos que se sometan a altas temperaturas en la superficie del suelo (horizonte A). La fracción de la textura más sensible es la arcilla, la cual comienza a modificarse con temperaturas aproximadas de 400 °C, llegando a una destrucción completa con temperaturas entre 700 °C y 800 °C. Para lograr afectaciones en la arena o el limo se requerirían temperaturas superiores a los 1414 °C, situaciones que raramente se presentan. Para el caso del Páramo Andino, Carrión-Paladines et al. (2023) concluyeron que las quemas de baja severidad no tienen efectos significativos sobre las propiedades físicoquímicas del suelo, en términos de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes, incluso un año después de la quema.

Para futuras investigaciones debe considerarse la distribución temporal de las mediciones. Es necesario realizar los muestreos de suelo, además de a los siete días y tres meses después de la quema, también seis meses, diez meses e, incluso, años después de la misma. También deben tomarse las muestras de suelo en cada parcela de quema con el objetivo de poder correlacionar las variables del comportamiento del fuego y las características del suelo. Igualmente sería interesante utilizar diseños experimentales y considerar diferentes tipos de suelo. Otra limitante de este trabajo consiste en la no medición con termopares de la temperatura de la llama a diferentes alturas sobre el suelo y profundidades.

## CONCLUSIONES

Los valores medios del peso del material combustible seco y del grosor de la capa de combustible antes de la quema fueron mayores en las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles que en las establecidas en el área de combustibles dispersos. En consecuencia, los valores medios fueron superiores para todos los parámetros del comportamiento del fuego en las parcelas ubicadas en las hileras de combustible, excepto para el caso de la velocidad de propagación.

El análisis de suelo demostró que, en ambos tipos de parcelas tres meses después de la quema, los valores medios de las características del suelo, si bien fueron inferiores y con diferencias estadísticas significativas a los que existían antes de aplicar el fuego, alcanzaron niveles numéricamente similares a los mismos, siendo algunos de ellos superiores en el caso de los combustibles dispersos. El estudio brinda una información que, aunque limitada por el poco tiempo utilizado para hacer las mediciones después de la quema y la no medición de la temperatura del fuego sobre y debajo del suelo, puede ser utilizada para la toma de decisiones en el contexto de la regulación del uso del fuego en las tierras de vocación forestal. Se ha probado la hipótesis de que durante la quema de los residuos provenientes del cultivo de *Zea mays* L. apilados en hileras y dispersos en toda el área, se alcanzan valores diferentes para los parámetros del comportamiento del fuego, lo que provoca también efectos diferentes sobre las características del suelo.

## RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Estatal del Sur de Manabí, institución financista del proyecto de investigación “Perfeccionamiento de la gestión de los incendios forestales en la provincia de Manabí, Ecuador”, en cuyo marco se desarrolló este trabajo. También al editor de la revista y a los evaluadores anónimos, quienes, con sus sabias recomendaciones, preguntas y observaciones, enriquecieron el trabajo.

## REFERENCIAS

- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Akburak, S., Son, Y., Makineci, E., & Çakir, M. (2018). Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a Quercus frainetto forest. *Journal of Forestry Research*, 29(3), 687-696. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0486-4>
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Farguell, J., & Úbeda, X. (2016). Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the Total Environment*, 572, 1329-1335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.115>



- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613-614, 944-957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Alexakis, D., Kokmotos, I., Gamyroula, D., & Varelidis, G. (2021). Wildfire effects on soil quality: application on a suburban area of West Attica (Greece). *Geosciences Journal*, 25(2), 243-253. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0011-1>
- Alva, E. (2019). Efectos en el suelo del incendio del bosque de Pagaibamba. Chota 2016. *Caxamará*, 18(1-2), 83-91.
- Álvaro, Á. B., Blum, C. T., Chitsondzo, C., Lombardi, K. C., & Batista, A. C. (2011). Efeitos da intensidade da queima controlada sobre o solo e diversidade da vegetação de campo em Irati - PR, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 6(3), 489-494. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i3a932>
- Batista, A. C., Beutling, A., & Pereira, J. F. (2013). Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliotii*. *Árvore*, 37(5), 779-787. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500001>
- Batista, A. C., Reissmann, C. B., & Soares, R. V. (1997). Efeitos da queima controlada sobre algumas propriedades químicas do solo em um povoamento de *Pinus taeda* no município de Sengés-PR. *Floresta*, 27(1/2), 59-70. <http://www.floresta.ufpr.br/firelab/wp-content/uploads/2013/09/artigo02.pdf>
- Bernal, A., Hernández, A., Mesa, M., Rodríguez, O., González, P. J., & Reyes, R. (2015). Características de los suelos y sus factores limitantes de la región de Murgas, provincia La Habana. *Cultivos Tropicales*, 36(2), 30-40. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Beyers, J., Brown, J., Busse, M., Debano, L., Elliot, W., Folliott, P. F., Jacoby, G. R., Knoepp, J. D., Landsberg, J. D., Neary, D. G., Reardon, J. R., Rinne, J. N., Robichaud, P. R., Ryan, K. C., Tiedemann, A. R., & Zwolinski, M. J. (2005). *Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water*. University of Nebraska - United States Department of Agriculture - Rocky Mountain Research Station.
- Bonfim, V. R., Ribeiro, G. A., Silva, E., & Braga, G. M. (2003). Diagnóstico do uso do fogo no entorno do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (PESB), MG. *Revista Árvore*, 27(1), 87-94. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622003000100012>
- Carrión-Paladines, V., Fries, A., Hinojosa, M. B., Oña, A., Jiménez Álvarez, L., Benítez, Á., López Rodríguez, F., & García-Ruiz, R. (2023). Effects of Low-Severity Fire on Soil Physico-Chemical Properties in an Andean Páramo in Southern Ecuador. *Fire*, 6(447), 1-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fire612044>
- Carroll, M. S., Edgeley, C. M., & Nugent, C. (2021). Traditional use of field burning in Ireland: History, culture and contemporary practice in the uplands. *International Journal of Wildland Fire*, 30(6), 399-409. <https://doi.org/10.1071/WF20127>
- Cavard, X., Bergeron, Y., Paré, D., Nilsson, M. C., & Wardle, D. A. (2019). Disentangling effects of time since fire, overstory composition and organic layer thickness on nutrient availability in canadian boreal forest. *Ecosystems*, 22(1), 33-48. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0251-3>
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Chungu, D., Ng'andwe, P., Mubanga, H., & Chileshe, F. (2020). Fire alters the availability of soil nutrients and accelerates growth of *Eucalyptus grandis* in Zambia. *Journal of Forestry Research*, 31(5), 1637-1645. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00977-y>
- Climate-Data (2022). *Clima Jipijapa (Ecuador)*. Climate-Data.org. <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/ecuador/provincia-de-manabi/jipijapa-25410/>
- Cruz, M. G., Hurley, R. J., Bessell, R., & Sullivan, A. L. (2020). Fire behaviour in wheat crops-effect of fuel structure on rate of fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 29(3), 258-271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF19139>
- DeBano, L. F. (2003). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, 231-232, 195-206. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3)
- Doerr, S. H., & Cerdà, A. (2005). Fire effects on soil system functioning: New insights and future challenges. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 339-342. <https://doi.org/10.1071/WF05094>
- Ferreira, A. J. D., Coelho, C. O. A., Ritsema, C. J., Boulet, A. K., & Keizer, J. J. (2008). Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach. *Catena*, 74(3), 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.05.007>
- Fidelis, A., Delgado-Cartay, M. D., Blanco, C. C., Müller, S. C., Pillar, V. D., & Pfadenhauer, J. (2010). Fire Intensity and Severity in Brazilian Campos Grasslands. *Interciencia*, 35(10), 739-745. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/81785>
- Francos, M., & Úbeda, X. (2021). Prescribed fire management. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 21, 100250. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100250>
- Galang, M. A., Markewitz, D., & Morris, L. A. (2010). Soil phosphorus transformations under forest burning and laboratory heat treatments. *Geoderma*, 155(3-4), 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.026>



- Gil Mora, J. E. (2020). Incendios forestales: causas e impactos. *El Antoniano*, 135(1), 68-113. <https://doi.org/10.51343/anto.v135i1.866>
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter - A review. *Environment International*, 30(6), 855-870. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Hernández, A., Arbelo Rodríguez, C. D., Rodríguez, N., Notario Del Pino, J., del Arco, M., & Rodríguez-Rodríguez, A. (2013). Efectos de un incendio forestal (Tenerife, Islas Canarias, verano de 2007) bajo bosques de pinar sobre algunas propiedades del suelo y su relación con la repelencia al agua a corto y medio plazo. *Spanish Journal of Soil Science*, 3(1), 56-72. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2013.V3.N1.04>
- IBM Corp. (2013). *IBM SPSS Statistics for Windows*, Version 22.0. IBM Corp.
- Julio, G., & Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 1(1), 18-27. <https://doi.org/10.4206/bosque.1975.v1n1-04>
- Londe de Camargos, V., Assunção Ribeiro, G., da Silva, F. A., Martins, S. V., & da Silva Carmo, M. F. (2015). Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais. *Ciência Florestal*, 25(3), 537-545. <https://doi.org/10.5902/1980509819605>
- Martínez-Becerra, L. W., Ramos-Rodríguez, M. P., Castillo-Martínez, I., Bonilla-Bichot, M., & Sotolongo-Sospedra, R. (2004). Efectos de quemas prescritas sobre las propiedades del suelo en bosques de *Pinus tropicalis* Morelet en Cuba. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(1), 31-35.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109(1-2), 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>
- Montiel Molina, C. (2013). Investigación geohistórica sobre las causas de los incendios forestales. *Montes*, 1791(114), 17-21.
- Nascimento, J. R., & Wiecheteck, M. (2014). *Como Implementar La Política De Tierras De Vocación Forestal*. Rural Prosper.<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3866.4163>
- Nghalipo, E., Joubert, D., Throop, H., & Groengroeft, A. (2018). The effect of fire history on soil nutrients and soil organic carbon in a semi-arid savanna woodland, central Namibia. *African Journal of Range and Forage Science*, 36(1), 9-16. <https://doi.org/10.2989/10220119.2018.1526825>
- Panico, S. C., Ceccherini, M. T., Memoli, V., Maisto, G., Pietramellara, G., Barile, R., & De Marco, A. (2020). Effects of different vegetation types on burnt soil properties and microbial communities. *International Journal of Wildland Fire*, 29(7), 628-636. <https://doi.org/10.1071/WF19081>
- Pyne, S. J. (2021). *Fire: a brief history*. Weyerhaeuser Environmental Books, *Cycle of Fire Series*. University of Washington Press.
- Ramos Rodríguez, M. P., Albán Ventura, D. O., Jimenez González, A., Mero Jalca, O. F., & Ganchozo Quimis, M. T. (2018). Planificación de una quema prescrita en una plantación de *Tectona grandis* Linn F. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(2), 184-194. <http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/325/>
- Ramos Rodríguez, M. P., Pico Coronel, O. G., Jimenez González, A., Cantos Cevallos, C. G., Tapia Zúñiga, M. V., & Mero Jalca, O. F. (2019). Comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador. *Revista Brasileirade Ciencias Agrarias*, 14(1), 1-9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5607>
- Ramos-Rodríguez, M. P., Cedeño-Cedeño, D. S., Batista, A. C., Jimenez-González, A., Manrique-Toala, T. O., & Tetto, A. F. (2021). Usos tradicionales del fuego en la Parroquia Ayacucho, Cantón Santa Ana, provincia Manabí, Ecuador. *Revistas Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(43), 41-52. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i43.5807>
- Redin, M., de Franceschi dos Santos, G., Miguel, P., Luís Denega, G., Lupatini, M., Doneda, A., & Lorensi de Souza, E. (2011). Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. *Ciência Florestal*, 21(2), 381-392. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/198050983243>
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna, J. A., Martínez-Lara, P. J., & Cruz-López, J. D. (2020). Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 641-654. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.33954>
- Rosero, J., & Osorio, I. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno Activa*, 5(1), 59-67. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130>
- Sağlam, B., Küçük, Ö., Bilgili, E., Dinç Durmaz, B., & Baysal, İ. (2008). Estimating Fuel Biomass of Some Shrub Species (Maquis) in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(4), 349-356. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol32/iss4/13>
- Santín, C., & Doerr, S. H. (2016). Fire effects on soils: The human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696), 28-34. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0171>



- Seger, C. D., Batista, A. C., Tetto, A. F., & Soares, R. V. (2013). Comportamento do Fogo em Queimas Controladas de Vegetação de Estepe no Município de Palmeira, Paraná, Brasil. *Floresta*, 43(4), 547-558. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v43i4.31385>
- Soares, R. V., Batista, A. C., & Tetto, A. F. (2017). *Incêndios florestais: controle, efeito e uso do fogo* (2a ed.). Gráfica Capital.
- Stavi, I. (2019). Wildfires in grasslands and shrublands: A review of impacts on vegetation, soil, hydrology, and geomorphology. *Water*, 11(5), 1042. <https://doi.org/10.3390/w11051042>
- Soares, R. V., & Hakkila, P. (1987). Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no Estado do Paraná, Brasil. *Floresta*, 17(1/2), 73-94. <https://doi.org/https://doi.org/10.5380/rf.v17i12.6379>
- Souza, I. V., Gomes, H., Sousa, D. A., Silvestre, A., Dornelas, P., Batista, A. C., Rodrigues, G., & Giongo, M. (2023). Predicting surface forest fuels on the cerrado in Cantão state park from airborne RGB sensor images. *Floresta*, 53(4), 538-547. <https://doi.org/10.5380/rf.v53i4.88805>
- Vega, J., Landsberg, J., Paysen, T., Alonso, M., Bará, S., & Fontúrbel, M. (2000). Efecto del fuego prescrito bajo arbolado de *P. pinaster* en suelo forestales de Galicia y Andalucía. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (9), 123-136. <https://doi.org/10.31167/csef.v0i9.9190>
- Weise, D. R., Koo, E., Zhou, X., Mahalingam, S., Morandini, F., & Balbi, J. H. (2016). Fire spread in chaparral - a comparison of laboratory data and model predictions in burning live fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 25(9), 980-994. <https://doi.org/10.1071/WF15177>
- White, B. L. A., de Oliveira, M. V. N., & Ribeiro, G. T. (2017). Avaliação e simulação do comportamento do fogo em diferentes fitofisionomias de uma área de Mata Atlântica Do Nordeste Brasileiro. *Floresta*, 47(3), 247-256. <https://doi.org/10.5380/rf.v47i3.50844>
- Manuscrito recibido el 11 de julio de 2022
- Aceptado el 14 de marzo de 2024
- Publicado el 06 de septiembre de 2024
- Este documento se debe citar como:
- Ramos-Rodríguez, M. P., Tigua-Parrales, M. J., Baque-Ramos, J. B., Manrique-Toala, T. O., & Castro-Landín, A. L. (2024). Efectos del fuego sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal. *Madera y Bosques*, 30(1), e3012509. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3012509>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.