

# Efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en *Tectona grandis* L.f. en Manabí, Ecuador

## Effects of meteorological and fuel variables on fire behavior in *Tectona grandis* L.f. in Manabí, Ecuador

Marcos Pedro Ramos-Rodríguez <sup>1</sup>  • Kimberly Yadira Macías-Briones <sup>2</sup>  • Ronny Andrés Cantos-Pionce <sup>2</sup>   
• Tayron Omar Manrique-Toala <sup>1</sup> 

Recibido: 11/09/2025

Aceptado: 28/11/2025

### Abstract

Controlled burn has been used as a management tool in tropical forest ecosystems, but its application in teak plantations requires a deeper understanding of fire behavior and the variables that influence it. This study aimed to analyze the effects of meteorological and fuel variables on fire behavior in *Tectona grandis* L.f. in Manabí, Ecuador. Fifteen experimental plots were established in a teak plantation where controlled burns were conducted, recording air temperature, relative humidity, wind speed, fuel dry weight, fuel moisture content, and litter layer thickness. The fire behavior parameters analyzed included flame height, rate of spread, fireline intensity, lethal scorch height, and heat released per unit area. The results showed that fire behavior was strongly influenced by fuel characteristics, particularly dry weight and moisture content, whereas meteorological variables did not exhibit significant correlations. Structured relationships among fire behavior parameters were identified, allowing for the proposal of simplified indicators for field monitoring. It was concluded that fuel load and moisture content are key determinants for planning safe and effective prescribed burns, and that their prior assessment helps mitigate risks and optimize silvicultural benefits. This study provides useful tools for sustainable forest management in tropical plantations, highlighting the need to incorporate fuel-related variables into prescribed burning planning models.

**Keywords:** Forest fuels, wildfires, fire management, controlled burn, preventive silviculture.

1. Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador; [marcos.ramos@unesum.edu.ec](mailto:marcos.ramos@unesum.edu.ec), [tyron.manrique@unesum.edu.ec](mailto:tyron.manrique@unesum.edu.ec)
2. Consultor Independiente, Manabí, Ecuador; [kimberlymacias63@gmail.com](mailto:kimberlymacias63@gmail.com), [ronnycantos\\_46@hotmail.com](mailto:ronnycantos_46@hotmail.com)

## Resumen

El fuego controlado ha sido empleado como herramienta de manejo en ecosistemas forestales tropicales, pero su aplicación en plantaciones de teca exige mayor conocimiento sobre el comportamiento del fuego y las variables que lo afectan. Este estudio tuvo como objetivo analizar los efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en *Tectona grandis* L.f. en Manabí, Ecuador. En una plantación de la especie mencionada se delimitaron 15 parcelas experimentales donde se aplicaron quemas controladas, registrándose temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, peso seco del combustible, humedad del material vegetal y espesura de la capa combustible. Los parámetros del fuego analizados fueron altura de las llamas, velocidad de propagación, intensidad lineal, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área. Los resultados mostraron que el comportamiento del fuego estuvo fuertemente influenciado por las características del combustible, especialmente el peso seco y la humedad, mientras que las variables meteorológicas no presentaron correlaciones significativas. Se identificaron relaciones estructuradas entre los parámetros del fuego, lo que permitió proponer indicadores simplificados para su monitoreo en campo. Se concluyó que la carga y el contenido de humedad del combustible son determinantes clave para planificar quemas seguras y eficaces, y que su evaluación previa permite mitigar riesgos y optimizar beneficios silviculturales. Este estudio aporta herramientas útiles para el manejo forestal sostenible en plantaciones tropicales, destacando la necesidad de incorporar variables del combustible en los modelos de planificación de quemas.

**Palabras clave:** Combustibles forestales, incendios forestales, manejo del fuego, quemas controladas, silvicultura preventiva.

## Introducción

En los ecosistemas forestales tropicales el fuego se constituye como una herramienta de manejo silvicultural cada vez más valorada por su capacidad para reducir combustibles forestales, mejorar la regeneración natural y disminuir la probabilidad de incendios catastróficos. No obstante, su aplicación exige un conocimiento detallado sobre el comportamiento del fuego y los factores que lo condicionan, particularmente en plantaciones de especies tropicales como *Tectona grandis* L.f. (teca), ampliamente cultivada por su alta rentabilidad y adaptabilidad en América Latina y Asia.

La acumulación de combustibles forestales sobre el piso de los bosques a lo largo de los años aumenta

drásticamente el riesgo de incendios [1]. En este contexto el uso del fuego como técnica preventiva y de manejo, ha demostrado ser eficaz en la modificación de las características del combustible, disminuyendo su carga y alterando su disposición espacial, con impactos directos en la reducción del riesgo de incendios forestales [4], [5]. En varias zonas de Ecuador los productores de madera de *T. grandis* suelen utilizar el fuego para eliminar residuos bajo el dosel, con la creencia, además, de que la quema mejora la belleza de la madera y favorece el crecimiento de los árboles. Sin embargo, esta práctica recurrente puede afectar negativamente el desarrollo adecuado de los mismos [2].

Se ha evidenciado que el fuego en plantaciones de teca genera una disminución en los contenidos de carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno y cationes como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , aunque se observa un aumento en el fósforo disponible. Esto puede tener implicaciones negativas para la fertilidad del suelo y la salud a largo plazo de las plantaciones si se realizan quemas con demasiada frecuencia [2]. En Nigeria fue documentado cómo la quema controlada reduce temporalmente la abundancia y diversidad de artrópodos del suelo en plantaciones de teca, lo que podría afectar funciones ecológicas como la descomposición, el reciclaje de nutrientes y la aireación del suelo [3]. Por otra parte, un estudio sobre germinación mostró que la exposición de semillas de teca a humo y fuego incrementa significativamente la tasa de germinación, lo que sugiere que estas técnicas podrían emplearse como herramientas auxiliares en viveros o procesos de regeneración artificial [4].

Adicionalmente, estudios en otras especies tropicales como *Eucalyptus grandis* y *Pinus yunnanensis* han permitido evidenciar que el fuego no solo altera el comportamiento térmico inmediato sino también influye en la disponibilidad de nutrientes del suelo, lo cual puede incidir en el crecimiento y la productividad futura de las plantaciones [5], [6], [7].

Diversas investigaciones han concluido que tanto las variables meteorológicas como las propiedades del combustible afectan significativamente los parámetros del comportamiento del fuego [6], [8], [9], [10]–[12]. No obstante, existe una marcada escasez de estudios aplicados específicamente a plantaciones de *T. grandis*, especialmente en contextos tropicales de sabana como los que caracterizan al cantón 24 de Mayo, Manabí, Ecuador, además de que la mayoría de los modelos de predicción del comportamiento del fuego existentes se han desarrollado en contextos de laboratorio o en ecosistemas templados [9], [13].

Asimismo, la mayoría de estudios se concentran en la evaluación de los efectos del fuego sobre la vegetación o el suelo, relegando a un segundo plano el análisis

técnico del comportamiento del fuego durante la quema, lo que impide establecer umbrales precisos para su control operativo [14]. Frente a esta situación, se requiere de investigaciones que aborden de forma integral la influencia de variables meteorológicas y del combustible en los parámetros físicos del fuego, especialmente en escenarios de quema controlada.

Considerando el contexto descrito anteriormente, el objetivo de esta investigación fue analizar los efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en *T. grandis* en Manabí, Ecuador, basados en la hipótesis de que tanto las variables meteorológicas como las del combustible afectan el comportamiento del fuego durante la realización de quemas controladas en plantaciones de *T. grandis*.

La importancia de este estudio radica en su contribución a la consolidación de protocolos técnicos para la implementación segura y eficaz de quemas controladas en plantaciones de teca, minimizando los riesgos de escape y optimizando los beneficios silviculturales y ecológicos. Este conocimiento es crucial para técnicos, tomadores de decisiones y comunidades locales involucradas en el manejo forestal sostenible.

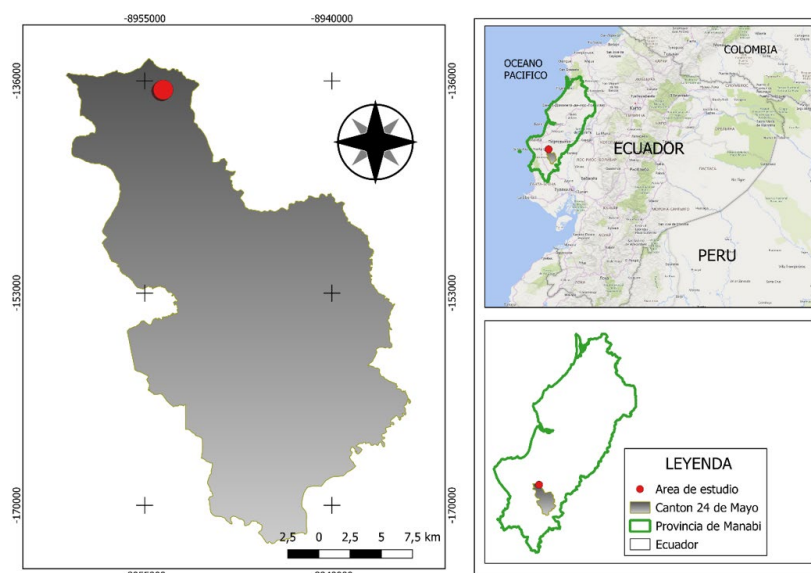
## Materiales y métodos

### Caracterización del área de estudio

El trabajo se realizó en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en el cantón 24 de Mayo, provincia

Manabí, Ecuador (figura 1) propiedad del Señor Segundo Álvarez quien autorizó la realización del experimento días antes de que se aplicara fuego controlado a toda el área. Cabe destacar que en Ecuador el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente [15] en el Artículo 384 establece que la Autoridad Ambiental Nacional podrá autorizar el uso del fuego, de forma excepcional, entre otras situaciones, en terrenos públicos o privados cuyas peculiaridades justifiquen el empleo del fuego controlado en prácticas agropecuarias, agroforestales o forestales, mediante previa aprobación de la Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con la Autoridad Nacional de Agricultura, y en observancia de los criterios técnicos que la misma establezca para el efecto. No obstante, aún no está vigente la Estrategia Nacional de Manejo Integral del Fuego y ni su Plan Nacional de Acción, que serán los instrumentos oficiales para la planificación, control, seguimiento y evaluación en esta materia, según indican los Artículos 376 y 377 del Reglamento citado anteriormente.

El cantón 24 de Mayo, tiene una extensión territorial de 614,09 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de 210 m s. n. m. Limita al norte con los cantones Rocafuerte, Tosagua y Bolívar; al sur con Santa Ana y Olmedo; al este con Bolívar, Olmedo y Santa Ana; y al oeste con Jipijapa y Rocafuerte. Su clima corresponde al tipo Aw (Sabana Tropical) según la clasificación de Köppen, con temperaturas que oscilan entre 22 °C y 26 °C y una precipitación anual de entre 700 y 1 500 mm, concentrada principalmente entre diciembre y mayo [16]. Las principales actividades económicas son la agricultura —con cultivos de *Zea mays* L.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

**Figure 1.** Location of the study area.

(maíz), *Musa* sp. (plátano), *Coffea arabica* L. (café) y *Theobroma cacao* L. (cacao)—, la ganadería de doble propósito (carne y leche), y en menor escala la pesca, la silvicultura y el turismo local, incluyendo atractivos naturales como cascadas y sitios de baño [17].

### Delimitación del área experimental

En la plantación de *T. grandis* donde se realizó la investigación se establecieron 15 parcelas rectangulares de 2 x 10 metros, dispuestas de forma continua entre las dos líneas de plantación centrales del rodal. En estas parcelas se llevó a cabo una quema controlada mediante la técnica de quema a favor del viento, aplicada en distintos intervalos horarios. Las parcelas 1 a la 5 (bloque 1) se quemaron entre las 9:00 y las 10:30 horas, de la 6 a la 10 (bloque 2) fueron quemadas entre las 11:00 y las 12:30 horas, mientras que las parcelas 11 a la 15 (bloque 3) se quemaron entre las 14:00 y las 15:45 horas. Con el fin de prevenir la propagación del fuego fuera del área experimental, se construyó un cortafuego perimetral de 1 metro de ancho alrededor de la zona de tratamiento (figura 2).

### Caracterización de variables meteorológicas y del combustible

La caracterización de las variables meteorológicas se efectuó mediante el registro de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante las distintas fases del experimento. Para ello, se empleó

un medidor meteorológico digital Ambient Weather WM-4 (fabricación china). Las mediciones se realizaron en tres momentos específicos: al inicio de la quema, cuando el frente de fuego alcanzó la mitad de la parcela y al momento en que el fuego arribó al extremo final. Todos los registros se tomaron a una altura de 0,50 m sobre la superficie del suelo y a una distancia horizontal de 1,00 m respecto al borde inicial de la parcela donde se originó la ignición.

Para la caracterización de las variables asociadas al material combustible, se recolectó información sobre el peso, el espesor de la capa de combustible acumulado sobre el suelo y el contenido de humedad. La cuantificación del peso y la cantidad de material combustible o materia seca previa a la quema se realizó mediante el método destructivo descrito por [18] y utilizado en estudios similares [19], [10]–[12], [20]. Conforme a este procedimiento, en el centro de cada parcela establecida sobre las hileras de combustible, se colectó una muestra representativa de miscelánea y ramas en un área de 2 500 cm<sup>2</sup>, delimitada por un marco de madera de 50 x 50 cm, extrayéndose completamente el material contenido en su interior.

El material recolectado fue separado en dos fracciones: a) miscelánea, comprendida por residuos no leñosos muertos, como hojas, frutos y humus, y b) ramas procedentes de la plantación o de vegetación herbácea con diámetros superiores a 0,7 cm. Posteriormente, el material de cada parcela fue pesado utilizando una balanza de gancho con precisión de 0,01 g. De cada muestra total se extrajo una submuestra superior a 50 g, la cual fue empacada en fundas de nailon con cierre hermético y transportada al Laboratorio de Bromatología de la Universidad Estatal del Sur de Manabí, donde fue secada en estufa a 75 °C durante 48 horas, según han hecho otros autores [21], [22].

La espesura de la capa de combustible depositado sobre el suelo se determinó a través de tres mediciones realizadas en los extremos y en el centro de cada parcela experimental. La humedad de los combustibles se determinó para cada parcela a través de la ecuación 1 [23].

$$w = \left( \frac{m_w - m_o}{m_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde: *w* es el contenido de humedad de la muestra en %; *m<sub>w</sub>* es el peso húmedo de la muestra en kg; *m<sub>o</sub>* es el peso de la muestra después del secado en la estufa en kg.

### Estimación de parámetros del comportamiento del fuego

La estimación del comportamiento del fuego durante el experimento se fundamentó en la medición de los



**Figura 2.** Ubicación de las parcelas de quema y medición de la altura de la llama.

**Figure 2.** Location of the burn plots and measurement of flame height.



siguientes parámetros: velocidad de propagación, altura de las llamas, intensidad lineal del fuego y calor liberado por unidad de área. La altura de las llamas se registró mediante una baliza graduada y una vara que se colocaba sobre la altura máxima de la llama en el momento de la medición (figura 2). Esto se realizó en cada parcela a distancias de 2, 4, 6 y 8 metros desde el punto de ignición, lo que permitió realizar cuatro mediciones por parcela. La velocidad de propagación del fuego ( $\text{m s}^{-1}$ ) se determinó cronometrando el tiempo requerido para que el frente de llama alcanzara el extremo opuesto de la parcela, considerando como referencia el momento en que el 50 % de la línea de fuego alcanzaba dicho límite.

La intensidad lineal del fuego [24], la altura de secado letal [25] y el calor desprendido por unidad de área [26] se estimaron a través de las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente.

$$I = H \times w \times r \quad (2)$$

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

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

Donde:  $I$  es la intensidad lineal del fuego en  $\text{kcal m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $H$  es el calor de combustión en  $\text{kcal kg}^{-1}$  ( $\pm 4\,000 \text{ kcal kg}^{-1}$ );  $w$  es el peso del combustible disponible en  $\text{kg m}^{-2}$ ,  $r$  es la velocidad de propagación del fuego en  $\text{m s}^{-1}$ ,  $h_s$  es la altura de secado letal en m,  $V$  es la velocidad el viento en  $\text{m s}^{-1}$ ,  $T$  es la temperatura del aire en  $^{\circ}\text{C}$  y  $H_a$  es el calor liberado por unidad de área en  $\text{kcal m}^{-2}$

**Cuadro 1.** Variables utilizadas en el experimento.

**Table 1.** Variables used in the experiment.

Variables	Descripción	Unidad
T	Temperatura del aire	$^{\circ}\text{C}$
Hr	Humedad relativa	%
Vv	Velocidad del viento	$\text{m.s}^{-1}$
PcA	Peso del material combustible seco antes de la quema	$\text{kg.m}^{-2}$
EspA	Espesura de la capa de combustible antes de la quema	cm
Hc	Humedad de los combustibles	%
Hll	Altura de las llamas	cm
Vpf	Velocidad de propagación del fuego	$\text{m.s}^{-1}$
I	Intensidad lineal del fuego	$\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
Hs	Altura de secado letal	m
Ha	Calor liberado por unidad de área	$\text{kcal.m}^{-2}$

La constante 60 se expresa en  $^{\circ}\text{C}$  y 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 [27]. Se consideró un calor de combustión seco de  $4\,000 \text{ kcal kg}^{-1}$  ( $16\,720 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) el cual ha sido utilizado en estudios previos [1], [19], [10]–[12], [20]. En quemas experimentales en *Pinus elliotii* se utilizó un valor medio de  $H = 15\,490 \text{ kJ kg}^{-1}$  [28]. En un bosque estacional semidecidual determinaron valores de poder calorífico seco entre  $4\,093$  y  $4\,623 \text{ kcal kg}^{-1}$  ( $17\,136.63$  y  $19\,355.65 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) [29].

$$H_w = H_d \left( \frac{100 - \frac{U}{7}}{100 + U} \right) \quad (5)$$

Donde:  $H_w$  es el calor de combustión del material húmedo en  $\text{kcal kg}^{-1}$ ,  $H_d$  es el calor de combustión del material seco en  $\text{kcal kg}^{-1}$  y  $U$  es el contenido de humedad del material combustible en %.

En el cuadro 1 se presentan y describen las variables utilizadas en el experimento.

### Correlación entre variables

Para establecer la relación entre las variables consideradas en el estudio, se emplearon los valores medios correspondientes a cada parcela sometida a quema. La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk reveló que unas variables seguían la distribución normal: humedad relativa ( $p = 0.066$ ), velocidad del viento ( $p = 0.135$ ), espesura de la capa de combustible ( $p = 0.229$ ), humedad del combustible ( $p = 0.458$ ), y altura de la llama ( $p = 0.838$ ), mientras que el resto de las variables no se ajustaron a la distribución normal ( $p < 0.05$ ).

En consecuencia, se calculó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman cuando al menos una de las dos variables en análisis no cumplía con el supuesto de normalidad y el coeficiente de correlación de Pearson únicamente cuando ambas variables sí lo cumplían. En ambos casos, se utilizó un nivel de significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ). El análisis estadístico fue realizado mediante el software IBM SPSS Statistics para Windows, versión 22.0 [30].

Con la ayuda de la herramienta ScholarGPT todos los datos registrados por parcela fueron estandarizados mediante la técnica de normalización Min-Max, que transforma los valores de cada variable en un rango de 0 a 1, preservando la distribución relativa. Esta transformación es útil para homogenizar unidades y escalar las variables antes del análisis comparativo. Para la visualización, se elaboró una matriz de calor (heatmap) utilizando el paquete seaborn sobre

matplotlib, con una paleta de colores degradada entre rojo y amarillo (YlOrRd), donde los valores normalizados se encuentran anotados en cada celda. La figura fue generada utilizando Python 3.11, ejecutado en un entorno computacional controlado mediante el módulo Jupyter. Las bibliotecas empleadas fueron: pandas (para manejo de datos), scikit-learn (para la normalización), y seaborn/matplotlib (para la visualización).

## Resultados

### Caracterización de las variables meteorológicas y del combustible

Los resultados muestran una variabilidad considerable en las condiciones experimentales entre parcelas. Durante las quemas controladas la temperatura del aire osciló entre 29,83 °C (parcela 14) y 34,67 °C (parcela 8), la humedad relativa entre 50,90 % (parcela 8) y 64,27 % (parcela 14), y la velocidad del viento fue baja, con un promedio de 0,06 m s<sup>-1</sup>, mostrando la desviación estándar la menor dispersión de los datos para el caso de la temperatura del aire. En cuanto al combustible, el peso seco previo a la quema tuvo una media de 1,10 kg m<sup>-2</sup> con un mínimo de 0,56 kg m<sup>-2</sup> (parcela 6) y un máximo de 2,31 kg m<sup>-2</sup> (parcela 12), mientras que la

espesura media fue de 13,57 cm con un mínimo de 7,67 cm (parcela 14) y un máximo de 21,67 cm (parcela 5). La humedad del combustible alcanzó un promedio de 12,41 % con un mínimo de 7,43 % (parcela 10) y un máximo de 19,65 % (parcela 4) observándose que los valores más bajos de esta variable se registraron en las parcelas 10 a la 15, precisamente las que se quemaron en horas de la tarde. La menor dispersión de los datos se obtuvo para el peso seco del combustible (cuadro 2).

### Parámetros del comportamiento del fuego

Los indicadores del comportamiento del fuego mostraron una variabilidad significativa entre parcelas. La altura de las llamas tuvo una media de 0,46 m con un mínimo de 0,35 m (parcela 15) y un valor máximo de 0,70 m (parcela 2), mientras que el valor medio de la velocidad de propagación del fuego fue de 0,0080 m s<sup>-1</sup> con un mínimo de 0,0045 m s<sup>-1</sup> (parcela 14) y un máximo de 0,0119 m s<sup>-1</sup> (parcelas 2, 4 y 12). La intensidad lineal del fuego promedió 31,06 kcal m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> con valores extremos de 12,28 kcal m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> (parcela 14) y 100,63 kcal m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> (parcela 12). Asimismo, se observó una altura de secado letal media de 4,04 m con valores mínimo y máximo de 2,12 m (parcela 14) y 8,88 m (parcela 12), respectivamente. El calor liberado por unidad de área mostró una media de 3906,23 kcal m<sup>-2</sup> registrándose un

**Cuadro 2.** Variables meteorológicas y del combustible el día de la quema en cada parcela experimental.

**Table 2.** The meteorological and fuel variables on the day of the burn in each experimental plot.

Parcelas	Variables meteorológicas			Variables del combustible		
	T (°C)	Hr (%)	Vv (m s <sup>-1</sup> )	PcA (kg m <sup>-2</sup> )	EspA (cm)	Hc (%)
1	30,23	61,47	0,20	0,90	14,33	15,87
2	31,03	61,27	0,03	0,95	16,33	15,94
3	31,33	59,77	0,03	0,76	19,67	14,53
4	31,67	58,33	0,07	0,77	16,33	19,65
5	32,80	57,20	0,03	1,04	21,67	13,20
6	34,07	53,10	0,00	0,56	13,67	14,08
7	34,60	52,43	0,10	0,74	9,00	13,52
8	34,67	50,90	0,13	0,80	11,67	13,91
9	32,07	58,30	0,00	0,61	12,33	14,03
10	31,23	59,17	0,03	2,20	13,33	7,43
11	31,13	60,13	0,00	2,13	11,33	9,07
12	30,67	61,00	0,10	2,31	15,33	8,23
13	30,53	62,47	0,00	1,19	9,33	9,28
14	29,83	64,27	0,17	0,75	7,67	8,79
15	30,17	63,53	0,10	0,84	11,67	8,65
<b>Media</b>	<b>29,83</b>	<b>50,90</b>	<b>0,06</b>	<b>1,10</b>	<b>13,57</b>	<b>12,41</b>
<b>± ds</b>	<b>1,59</b>	<b>4,01</b>	<b>0,06</b>	<b>0,59</b>	<b>3,86</b>	<b>3,59</b>

Nota: T: Temperatura del aire; Hr: Humedad relativa; Vv: Velocidad del viento; PcA: Peso del material combustible seco antes de la quema; EspA: Espesura de la capa de combustible antes de la quema; Hc: Humedad de los combustibles; ± ds: Desviación estándar.

mínimo de 1936,73 kcal m<sup>-2</sup> (parcela 6) y un máximo de 8452,94 kcal m<sup>-2</sup> (parcela 12) (cuadro 3).

### Análisis de correlación

Las correlaciones entre las variables meteorológicas y el comportamiento del fuego fueron, en su mayoría, débiles y no significativas. Por ejemplo, la temperatura del aire no mostró correlación estadísticamente significativa con ninguno de los parámetros del fuego. Aunque se observaron correlaciones moderadas negativas entre temperatura y calor liberado ( $r = -0,436$ ;  $p = 0,104$ ), y positivas entre temperatura y velocidad de propagación ( $r = 0,399$ ;  $p = 0,141$ ), estas no alcanzaron significancia estadística (cuadro 4).

Con respecto a las variables del combustible y del comportamiento del fuego se encontraron correlaciones fuertes y significativas entre el peso seco del combustible y varios parámetros del comportamiento del fuego. Destacan: intensidad lineal del fuego ( $r = 0,804$ ;  $p < 0,001$ ), altura de secado letal ( $r = 0,643$ ;  $p = 0,010$ ), y calor liberado por unidad de área ( $r = 0,975$ ;  $p < 0,001$ ). La humedad del combustible también se relacionó significativamente con la velocidad de propagación ( $r = 0,533$ ;  $p = 0,041$ ) y mostró una correlación negativa con

el calor liberado ( $r = -0,593$ ;  $p = 0,020$ ), indicando que combustibles más húmedos disminuyen la liberación de calor (cuadro 5).

Las correlaciones entre los parámetros del fuego revelaron relaciones significativas para intensidad lineal del fuego con altura de secado letal ( $r = 0,943$ ;  $p < 0,001$ ), intensidad lineal con calor liberado ( $r = 0,707$ ;  $p = 0,003$ ), altura de secado letal con calor liberado ( $r = 0,568$ ;  $p = 0,027$ ), y altura de las llamas con velocidad de propagación ( $r = 0,628$ ;  $p = 0,012$ ) (cuadro 6).

La figura 3 presenta análisis de regresión que exploran la relación entre el peso seco del combustible y tres variables clave del comportamiento del fuego. En la figura 3A se observa una correlación entre el peso seco del combustible y la intensidad lineal. La figura 3B muestra una asociación entre el peso seco y la altura de secado letal. Finalmente, la figura 3C establece un vínculo entre el peso seco del combustible y el calor liberado por unidad de área. Las ecuaciones obtenidas tienen importancia práctica toda vez que las mismas pueden utilizarse para modificar la carga o cantidad de combustible antes de quemar con vistas a obtener el comportamiento del fuego deseado.

**Cuadro 3.** Valores de los parámetros del comportamiento del fuego en cada parcela de quema.

**Table 3.** The values of the fire behavior parameters in each burn plot.

Parcelas	Hll (m)	Vpf (m s <sup>-1</sup> )	I		hs (m)	Ha (kcal m <sup>-2</sup> )
			(kcal. m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	(kw m <sup>-1</sup> )		
1	0,59	0,0072	22,06	92,26	3,18	3043,79
2	0,70	0,0119	38,06	159,22	4,71	3197,26
3	0,46	0,0064	16,77	70,13	2,75	2615,46
4	0,58	0,0119	29,60	123,82	4,07	2486,48
5	0,45	0,0072	26,13	109,31	3,90	3606,27
6	0,36	0,0098	18,99	79,43	3,31	1936,73
7	0,38	0,0069	17,68	73,97	3,22	2546,26
8	0,42	0,0104	28,53	119,35	4,44	2739,04
9	0,54	0,0083	17,40	72,79	2,90	2088,26
10	0,40	0,0056	44,99	188,20	5,30	8098,53
11	0,37	0,0067	51,48	215,34	5,77	7721,86
12	0,60	0,0119	100,63	420,94	8,88	8452,94
13	0,43	0,0049	21,05	88,05	3,12	4294,04
14	0,40	0,0045	12,28	51,39	2,12	2727,19
15	0,35	0,0067	20,26	84,76	3,00	3039,34
<b>Media</b>	<b>0,46</b>	<b>0,0080</b>	<b>31,06</b>	<b>129,93</b>	<b>4,04</b>	<b>3906,23</b>
<b>± ds</b>	<b>0,10</b>	<b>0,0025</b>	<b>22,19</b>	<b>92,85</b>	<b>1,67</b>	<b>2244,24</b>

Nota: 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; ± ds: Desviación estándar

**Cuadro 4.** Resultados de la correlación de Pearson (P) y de Spearman (S) entre variables meteorológicas y del comportamiento del fuego.

**Table 4.** Results of the Pearson (P) and Spearman (S) correlation between meteorological variables and fire behavior variables.

Variables	r	p
Temperatura – Altura de las llamas (S)	-0,109	0,699
Temperatura – Velocidad de propagación (S)	0,399	0,141
Temperatura – Intensidad lineal (S)	-0,021	0,940
Temperatura – Altura de secado letal (S)	0,221	0,428
Temperatura – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,436	0,104
Humedad relativa – Altura de las llamas (P)	0,242	0,386
Humedad relativa – Velocidad de propagación (P)	-0,334	0,224
Humedad relativa – Intensidad lineal (S)	-0,032	0,909
Humedad relativa – Altura de secado letal (S)	-0,275	0,321
Humedad relativa – Calor liberado por unidad de área (S)	0,396	0,143
Velocidad del viento – Altura de las llamas (S)	0,134	0,633
Velocidad del viento – Velocidad de propagación (S)	0,066	0,815
Velocidad del viento – Intensidad lineal (S)	-0,057	0,841
Velocidad del viento – Altura de secado letal (S)	-0,102	0,717
Velocidad del viento – Calor liberado por unidad de área (S)	0,015	0,959

Nota: \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Al integrar las variables utilizadas en el experimento (figura 4) se obtuvo que la temperatura del aire y velocidad del viento tienden a presentar mayores valores relativos en las parcelas del bloque 3, coherente con el ascenso térmico hacia las horas vespertinas. Esto favorece un ambiente más propenso al secado del material combustible. La humedad relativa por su parte muestra un patrón inverso: los valores más bajos se concentran en las parcelas quemadas en la tarde, lo que resulta coherente con la disminución de humedad ambiental hacia mediodía y primeras horas de la tarde. La humedad de los combustibles fue más baja en el bloque 3, lo cual es una consecuencia directa de las condiciones meteorológicas descritas y refleja un mayor grado de secado del material en ese horario.

En correspondencia con lo anterior, las variables altura de las llamas, velocidad de propagación del fuego e intensidad lineal del fuego muestran valores

**Cuadro 5.** Resultados de la correlación de Pearson (P) y de Spearman (S) entre variables del combustible y del comportamiento del fuego.

**Table 5.** Results of the Pearson (P) and Spearman (S) correlation between fuel variables and fire behavior variables.

Variables	r	p
Peso seco del combustible – Altura de las llamas (S)	0,232	0,405
Peso seco del combustible – Velocidad de propagación (S)	-0,052	0,854
Peso seco del combustible – Intensidad lineal (S)	0,804**	0,000
Peso seco del combustible – Altura de secado letal (S)	0,643**	0,010
Peso seco del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	0,975**	0,000
Espesura del combustible – Altura de las llamas (P)	0,431	0,109
Espesura del combustible – Velocidad de propagación (P)	0,374	0,169
Espesura del combustible – Intensidad lineal (S)	0,284	0,304
Espesura del combustible – Altura de secado letal (S)	0,245	0,379
Espesura del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	0,043	0,879
Humedad del combustible – Altura de las llamas (P)	0,503	0,056
Humedad del combustible – Velocidad de propagación (P)	0,533*	0,041
Humedad del combustible – Intensidad lineal (S)	-0,186	0,508
Humedad del combustible – Altura de secado letal (S)	-0,161	0,567
Humedad del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,593*	0,020

Nota: \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

normalizados elevados en las parcelas del bloque 3. De forma congruente, la variable calor liberado por unidad de área también mostró mayores valores en dicho bloque, reflejando una mayor eficiencia de combustión asociada a menor humedad en los combustibles y mejores condiciones de ignición. También en el bloque 3 la altura de secado letal se incrementó lo cual implica un mayor impacto térmico en las ramas inferiores de los árboles.

Tanto el peso del combustible antes de la quema como el espesor de la capa de combustible presentaron altos valores normalizados en algunas parcelas del bloque 2,



**Cuadro 6.** Resultados de la correlación de Pearson (P) y de Spearman (S) entre variables del comportamiento del fuego.

**Table 6.** Results of the Pearson (P) and Spearman (S) correlation between fire behavior variables.

Variables	r	p
Altura de las llamas – Velocidad de propagación (P)	0,628*	0,012
Altura de las llamas – Intensidad lineal (S)	0,275	0,321
Altura de las llamas – Altura de secado letal (S)	0,164	0,558
Altura de las llamas – Calor liberado por unidad de área (S)	0,157	0,576
Velocidad de propagación – Intensidad lineal (S)	0,436	0,104
Velocidad de propagación – Altura de secado letal (S)	0,508	0,053
Velocidad de propagación – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,171	0,543
Intensidad lineal – Altura de secado letal (S)	0,943**	0,000
Intensidad lineal – Calor liberado por unidad de área (S)	0,707**	0,003
Altura de secado letal – Calor liberado por unidad de área (S)	0,568*	0,027
Humedad del combustible – Altura de las llamas (P)	0,503	0,056
Humedad del combustible – Velocidad de propagación (P)	0,533*	0,041
Humedad del combustible – Intensidad lineal (S)	-0,186	0,508
Humedad del combustible – Altura de secado letal (S)	-0,161	0,567
Humedad del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,593*	0,020

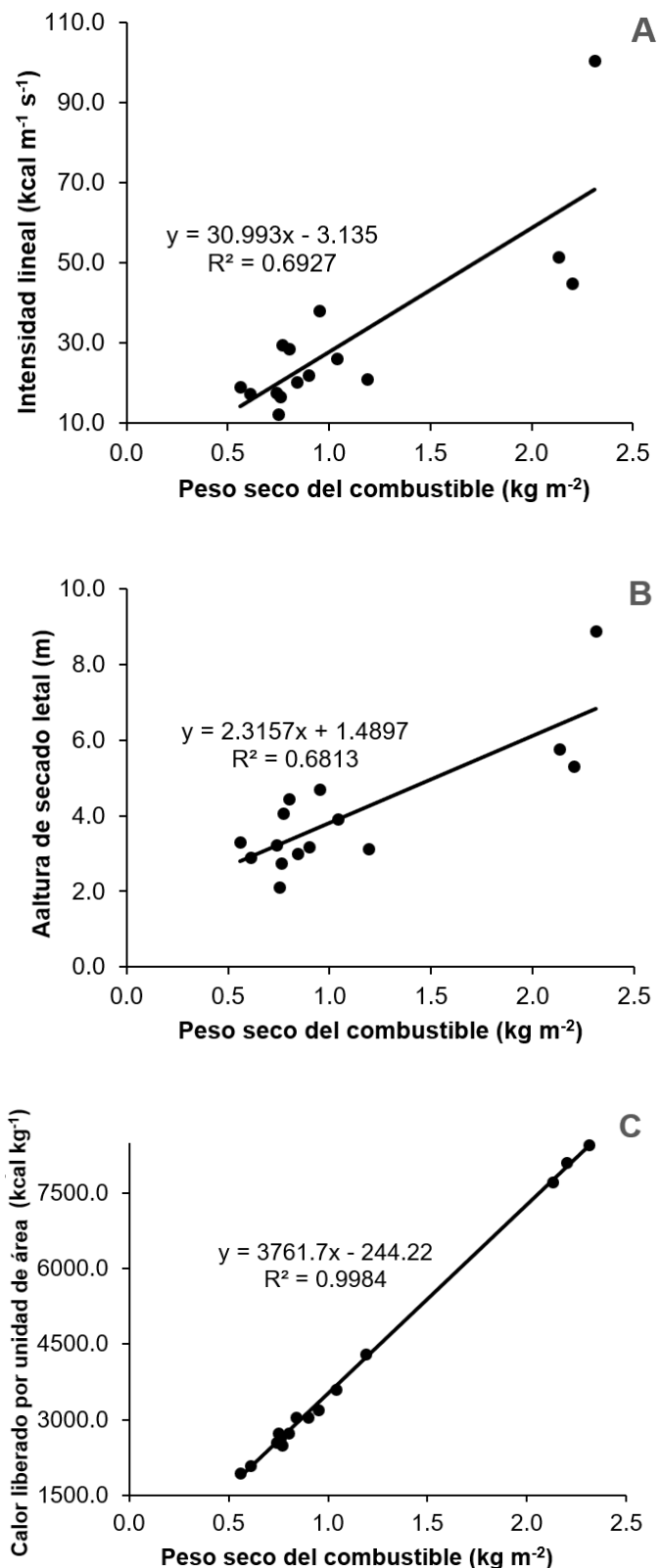
Nota: \*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

lo cual podría haber afectado localmente los parámetros del comportamiento del fuego.

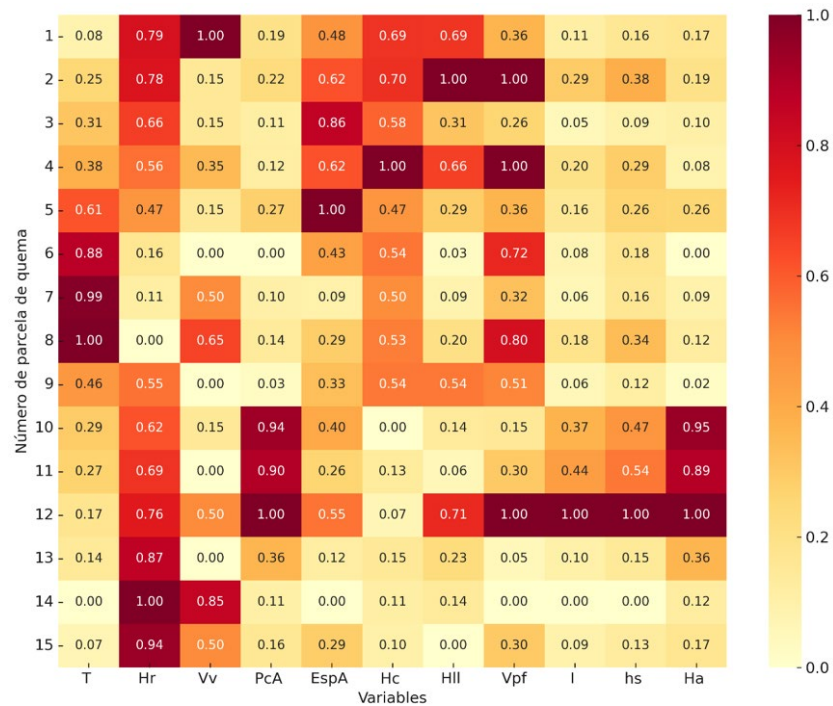
## Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten evidenciar que el comportamiento del fuego en plantaciones de *T. grandis* responde con mayor sensibilidad a las características del combustible que a las variables meteorológicas registradas durante la ejecución de las quemas controladas. Esta afirmación cobra relevancia en el contexto silvicultural tropical, donde las condiciones climáticas pueden variar



**Figura 3.** Análisis de regresión entre el peso seco del material combustible y la intensidad lineal (A), la altura de secado letal (B) y el calor liberado por unidad de área (C).

**Figure 3.** Regression analysis between the dry fuel weight and the linear intensity (A), the lethal desiccation height (B), and the heat released per unit area (C).



**Figura 4.** Mapa de calor de variables estandarizadas de condiciones meteorológicas, del combustible y del comportamiento del fuego en parcelas de quema.

**Figure 4.** Heatmap of standardized meteorological, fuel, and fire behavior variables across burn plots.

ampliamente en cortos periodos, pero el combustible suele presentar patrones más constantes de acumulación y distribución [1].

La débil correlación estadística observada entre variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento con los parámetros del comportamiento del fuego contrasta con lo reportado en estudios previos que señalan una influencia moderada a fuerte de estos factores en ecosistemas templados y sabanas [31]. Esta discrepancia podría deberse a la baja velocidad del viento registrada durante las quemas ( $0,06 \text{ m s}^{-1}$  en promedio), insuficiente para modificar significativamente la propagación del fuego. Además, la limitada variabilidad térmica y de humedad durante las quemas sugiere un rango de condiciones meteorológicas que, si bien relevantes, no alcanzaron valores extremos capaces de incidir marcadamente en la dinámica del fuego [8].

Sin embargo, los valores más altos de los parámetros del comportamiento del fuego se registraron en las parcelas 10, 11 y 12 coincidiendo esto con valores bajos de humedad del combustible, variable que depende de las condiciones meteorológicas. Estas parcelas se quemaron entre las 12:00 y las 14:00 horas, por lo que en el caso específico de plantaciones de teca se sugiere usar el fuego antes o después de este periodo de

tiempo para evitar valores de intensidad lineal mayores a  $40,00 \text{ kcal m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , así como alturas de secado letal superiores a  $5 \text{ m}$  y de calor liberado por unidad de área superiores a  $4 \text{ 300,00 kcal m}^{-2}$ . Para lograr lo anterior debe quemarse con valores de humedad relativa entre  $50,00$  y  $58,00 \%$ . Sería interesante repetir este estudio en plantaciones de teca con diferentes edades y quemando un mayor número de parcelas a una hora determinada cada dos horas. Esto pudiera realizarse entre las 9:00 y las 18:00 horas, siempre que se cuente con los permisos necesarios en caso de encontrarse reglamentada esta actividad en la región donde se decida realizar el experimento.

En contraste, las variables del combustible demostraron una influencia estadísticamente significativa en varios parámetros del fuego, particularmente el peso seco del combustible, el cual se relacionó fuertemente con la intensidad lineal ( $r = 0,804$ ;  $p < 0,001$ ), la altura de secado letal ( $r = 0,643$ ;  $p = 0,010$ ) y el calor liberado por unidad de área ( $r = 0,975$ ;  $p < 0,001$ ). Este hallazgo es congruente con estudios que subrayan que la cantidad y calidad del combustible disponible son los principales determinantes del comportamiento del fuego durante el desarrollo de quemas controladas [12], [20], por eso un inventario previo del material combustible permite estimar con mayor precisión el comportamiento esperado del fuego [21]. En correspondencia con lo

anterior se sugiere realizar las quemas en plantaciones de teca siempre y cuando exista una carga de combustible inferior a 1,00 kg m<sup>-2</sup>.

En plantaciones de *T. grandis*, la acumulación de material muerto en el sotobosque constituye una fuente importante de combustible fino y moderadamente grueso, cuya carga y disposición condicionan la intensidad y propagación del fuego [2]. En plantaciones de teca, se han documentado valores medios de carga de combustible seco de 11,17 t.ha<sup>-1</sup> [1], muy similar a lo obtenido en este estudio.

Las correlaciones entre variables sugieren que a medida que aumenta la biomasa disponible, se incrementa proporcionalmente la energía liberada por unidad de longitud de frente de fuego. También indican que mayores cantidades de combustible seco podrían propiciar una mayor transferencia de calor vertical, afectando más intensamente la vegetación a diferentes alturas, así como que la acumulación de material combustible seco contribuye significativamente a la magnitud del evento térmico superficial. Estos patrones de regresión refuerzan la importancia del manejo de carga de combustible en la modelación y mitigación de quemas controladas y prescritas, ya que el peso seco del combustible emerge como un predictor importante de varios parámetros críticos del comportamiento del fuego.

Así mismo, la relación significativa y negativa entre la humedad del combustible y el calor liberado ( $r = -0,593$ ;  $p = 0,020$ ) concuerda con estudios que demuestran que el contenido hídrico del combustible actúa como un modulador natural de la intensidad del fuego, al aumentar la energía requerida para su ignición y combustión [23], [19]. Esto implica que, incluso en escenarios con altas cargas de combustible, es posible reducir el riesgo de altas intensidades térmicas si se programan las quemas en días con niveles adecuados de humedad del combustible, los que según los resultados de este trabajo para el caso de plantaciones de teca deben ser superiores al 10,00 %.

Por otra parte, las correlaciones significativas entre parámetros del fuego como la intensidad lineal, la altura de secado letal y el calor liberado, evidencian que existe una relación estructural entre estos indicadores, lo cual puede ser aprovechado para diseñar modelos de predicción simplificados en campo [24], [25]. Tal interdependencia es útil desde una perspectiva operativa, pues facilita la toma de decisiones en tiempo real al observar el comportamiento de una sola variable como proxy de otras.

Los resultados visualizados en la figura corroboran la hipótesis de que las variables meteorológicas, en particular la temperatura y la humedad relativa,

junto con las características físicas del combustible, tienen un efecto directo sobre el comportamiento del fuego en plantaciones de *T. grandis*. La distribución de los valores normalizados sugiere que el horario de quema influye marcadamente en la disponibilidad de los combustibles, y por ende en la peligrosidad y comportamiento del fuego.

Una interpretación crítica de estos resultados debe considerar algunas limitaciones metodológicas. En primer lugar, el tamaño de muestra relativamente reducido (15 parcelas) y la variabilidad espacial de las condiciones dentro del sitio experimental podrían haber influido en la dispersión de los datos. Asimismo, las mediciones puntuales de las condiciones meteorológicas (realizadas en tres momentos durante la quema de cada parcela) no captan la variabilidad microclimática que puede surgir durante la propagación del fuego, lo cual reduce la capacidad de detectar correlaciones significativas con alta precisión [14]. Adicionalmente, si bien se emplearon ecuaciones ampliamente aceptadas para estimar parámetros como la intensidad lineal y el calor liberado [24], [25], estas fórmulas asumen ciertas constantes (como el calor de combustión) que pueden variar según las características específicas del combustible local. En consecuencia, se recomienda calibrar estos modelos con valores obtenidos in situ para mejorar la precisión de las estimaciones.

A pesar de estas limitaciones, los hallazgos de este estudio representan un avance significativo en la comprensión del comportamiento del fuego en plantaciones tropicales de teca. En un contexto donde el uso del fuego como herramienta de manejo forestal aún genera debate, estos resultados aportan evidencia concreta sobre cómo las características del combustible condicionan los efectos del fuego, lo cual es crucial para diseñar quemas más seguras y eficaces [7], [10].

La aplicación de quemas controladas bien planificadas puede contribuir a reducir la acumulación de material combustible, minimizar el riesgo de incendios no deseados y, en algunos casos, favorecer procesos ecológicos como la regeneración natural o la mejora de la sanidad del rodal [3], [19]. Asimismo, la identificación de umbrales críticos de humedad y carga de combustible ofrece herramientas prácticas tanto para los productores que ponen fuego controlado a sus plantaciones de teca como para los técnicos forestales encargados de planificar y ejecutar quemas prescritas en plantaciones de esta especie.

Este estudio también reafirma la importancia de integrar múltiples variables —meteorológicas, estructurales del combustible y parámetros del fuego— en los modelos de planificación de quemas, como lo sugieren investigaciones en otras especies tropicales y sistemas de simulación [13], [7]. Dichos modelos permiten

proyectar escenarios de comportamiento del fuego bajo diferentes combinaciones de variables, lo cual resulta útil en contextos de alta incertidumbre climática como el de la región tropical ecuatoriana.

En términos de proyección, se recomienda ampliar la investigación incorporando sensores remotos para el monitoreo en tiempo real de las condiciones meteorológicas y del combustible, así como aumentar el número de parcelas y replicar el experimento en otras localidades con plantaciones de *T. grandis*. Esto permitiría validar los patrones encontrados y avanzar hacia la formulación de modelos predictivos robustos adaptados a los ecosistemas del neotrópico.

Finalmente, el presente estudio contribuye de forma sustantiva a la base científica y técnica del manejo del fuego en plantaciones tropicales, consolidando el conocimiento necesario para una gestión forestal sostenible que integre la reducción de riesgos con la productividad y conservación ecológica del sistema. A la vez, los resultados se enmarcan en el cumplimiento de la Agenda Nacional de Investigación sobre Manejo Integral del Fuego, la misma que constituye una política pública que establece lineamientos de investigación científica, tecnológica y/o de innovación necesarios para complementar los avances del país en la implementación de este enfoque. Este estudio se enmarca en la línea de investigación “Manejo del fuego”, sublínea “Uso del fuego a través de quemaduras prescritas y controladas basado en objetivos de manejo para la protección y conservación, así como para la gestión del territorio” (<https://bit.ly/3ZBju2t>).

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el comportamiento del fuego en quemaduras controladas dentro de plantaciones de *T. grandis* está influenciado principalmente por las características del combustible, en especial el peso seco y el contenido de humedad, más que por las variables meteorológicas. No obstante, se evidenció que las condiciones meteorológicas más extremas durante el horario vespertino (mayor temperatura del aire, menor humedad relativa) provocan un secado más efectivo de los combustibles, lo cual se traduce en un comportamiento más intenso y peligroso del fuego. La intensidad lineal, la altura de secado letal y el calor liberado por unidad de área se vieron fuertemente determinados por la cantidad de combustible disponible, mientras que la humedad del mismo moduló la severidad del fuego al disminuir significativamente su propagación y energía liberada. Estas relaciones validan la hipótesis planteada y resaltan la importancia de los resultados obtenidos para la ejecución de quemaduras controladas y el diseño de quemaduras prescritas, ya que reafirman la necesidad de

realizarlas en horarios de menor riesgo para minimizar impactos no deseados.

Por otra parte, aunque se registraron variaciones en temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, estas no mostraron una correlación estadísticamente significativa con los parámetros del comportamiento del fuego. Esto sugiere que, bajo condiciones meteorológicas moderadas como las del presente experimento, el fuego puede mantenerse dentro de márgenes operativamente seguros si se controla adecuadamente el estado del combustible. Asimismo, la observación de relaciones estructuradas entre los parámetros del fuego permite proponer indicadores operativos simples, que pueden facilitar la toma de decisiones en campo durante la ejecución de quemaduras controladas.

En conjunto, los hallazgos de este trabajo aportan evidencia técnica relevante para el diseño de protocolos de manejo del fuego en plantaciones tropicales. La planificación de quemaduras controladas con base en la carga y humedad del combustible, más que en condiciones meteorológicas aisladas, puede reducir riesgos y maximizar los beneficios silviculturales y ecológicos del uso del fuego. Este conocimiento representa un avance hacia una gestión forestal sostenible, orientada a prevenir incendios no deseados, mantener la productividad del rodal y conservar la funcionalidad ecológica del ecosistema.

## Referencias

- [1] M. P. Ramos Rodríguez, et al., “Planificación de una quema prescrita en una plantación de *Tectona grandis* Linn F,” *Rev. Cuba. Ciencias For.*, vol. 6, no. 2, Agust., pp. 184–194, 2018.
- [2] O. A. Oseni, et al., “Effects of fire on physico-chemical properties and proteolytic enzyme activities of soil from teak (*Tectona grandis* L. F) plantations,” *Sustain. Dev.*, vol. 1, no. 3, Dec., pp. 79–85, 2009.
- [3] O. S. Osabiya and S. A. Adeduntan, “Effects of controlled fire on the abundance and diversity of arthropods at Obanla Natural Forest and teak plantation, Akure, Ondo State, Nigeria,” *J. Res. For. Wildl. Environ.*, vol. 12, no. 3, Dec., pp. 25–31, 2020.
- [4] A. Singh and P. Raizada, “Seed germination of selected dry deciduous trees in response to fire and smoke,” *J. Trop. For. Sci.*, vol. 22, no. 4, Oct., pp. 465–468, 2010.
- [5] D. Chungu, et al., “Fire alters the availability of soil



- nutrients and accelerates growth of *Eucalyptus grandis* in Zambia,” *J. For. Res.*, vol. 31, no. 5, May., pp. 1637–1645, 2020.
- [6] J. Wang, et al. “Effects of Prescribed Burning on Surface Dead Fuel and Potential Fire Behavior in *Pinus yunnanensis* in Central Yunnan Province, China,” *Forests*, vol. 14, no. 9, Sept., pp. 1-18, 2023. [doi.10.3390/f14091915](https://doi.org/10.3390/f14091915)
- [7] I. Allen, et al., “Modeling Juvenile Stand Development and Fire Risk of Post-Fire Planted Forests under Variations in Thinning and Fuel Treatments Using FVS–FFE,” *Forests*, vol. 14, no. 6, Jun., pp. 1-25, 2023. [doi.10.3390/f14061223](https://doi.org/10.3390/f14061223)
- [8] I. M. Mirra, et al., “Fuel dynamics following fire hazard reduction treatments in blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantations in Portugal,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 398, Aug., pp. 185–195, 2017. [doi.10.1016/j.foreco.2017.05.016](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.016)
- [9] B. L. A. White, et al., “Empirical models for describing fire behavior in Brazilian commercial eucalypt plantations,” *Cerne*, vol. 22, no. 4, Dec., pp. 397–406, 2016.
- [10] M. P. Ramos Rodríguez, et al., “Comportamiento del fuego en quemas controladas en tierras de vocación forestal en Sancán, Manabí, Ecuador,” *Rev. Cuba. Ciencias For.*, vol. 12, no. 1, Apr., pp. 2–21, 2024.
- [11] A. D. Tiglla-Moposita and M. P. Ramos-Rodríguez, “Comportamiento del fuego en quemas controladas para limpieza de terreno en la comunidad Andil, Manabí, Ecuador,” *Rev. Científica Innovación Educ. y Soc. Actual “ALCON,”* vol. 5, no. 3, Jun., pp. 442–459, 2025. [doi.10.62305/alcon.v5i3.637](https://doi.org/10.62305/alcon.v5i3.637)
- [12] M. P. Ramos-Rodríguez, et al., “Efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en quemas controladas para limpieza de terrenos,” *UNESUM-Ciencias*, vol. 9, no. 2, Aug., pp. 137–151, 2025. [doi.10.47230/unesum-ciencias.v9.n2.2025.137-151](https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v9.n2.2025.137-151)
- [13] Z. D. Lyon, et al., “Fire behaviour in masticated forest fuels: Lab and prescribed fire experiments,” *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 27, no. 4, Apr., pp. 280–292, 2018. [doi.10.1071/WF17145](https://doi.org/10.1071/WF17145)
- [14] M. A. Arthur, B. A. Blankenship, A. Schörgendorfer, and H. D. Alexander, “Alterations to the fuel bed after single and repeated prescribed fires in an Appalachian hardwood forest,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 403, no. July, pp. 126–136, 2017. [doi.10.1016/j.foreco.2017.08.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.011)
- [15] Asamblea Nacional de la República del Ecuador, “Reglamento al Código Orgánico del Ambiente,” Quito, 2019.
- [16] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de 24 de Mayo, “Fase diagnóstico”. en Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2023 / 2035 cantón 24 de Mayo. Jipijapa, Manabí, Ecuador. p. 355, 2024.
- [17] M. Camino, et al., “Diagnóstico de Sectores Productivos Priorizados para Estrategias” en Plan de estrategias para la reactivación económica cantón 24 de Mayo.” Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Manta, Manabí. p. 115, 2020.
- [18] M. G. Cruz, R. J. Hurley, R. Bessell, and A. L. Sullivan, “Fire behaviour in wheat crops-effect of fuel structure on rate of fire spread,” *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 29, no. 3, Jan., pp. 258–271, 2020. [doi.10.1071/WF19139](https://doi.org/10.1071/WF19139)
- [19] M. P. Ramos Rodríguez, et al., “Comportamiento del fuego a escala experimental en una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Jipijapa, Manabí, Ecuador,” *Rev. Bras. Ciencias Agrar.*, vol. 14, no. 1, Mar., pp. 1–9, 2019. [doi.10.5039/agraria.v14i1a5607](https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5607)
- [20] M. P. Ramos-Rodríguez, et al., “Efectos del fuego sobre características físicas, químicas y nutricionales del suelo en tierras de vocación forestal,” *Madera y Bosques*, vol. 30, no. 1, Mar., pp. 1–17, 2024.
- [21] C. D. Seger, et al., “Comportamento do Fogo em Queimas Controladas de Vegetação de Estepe no Município de Palmeira, Paraná, Brasil,” *Floresta*, vol. 43, no. 4, Dec., pp. 547–558, 2013.
- [22] C. D. Seger, et al., “Incremento da biomassa aérea da vegetação dos campos naturais do Paraná em período pós-queima,” *Floresta*, vol. 46, no. 1, pp. 93–101, 2016.
- [23] H. Čekovská, et al., “*Tectona grandis* Linn. and its fire characteristics affected by the thermal modification of wood,” *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 2805–2817, 2017.
- [24] G. M. Byram, “Combustion of forest fuels,” in *Forest fire: control and use.*, New York:, K. P. Davis, Ed. 1959, pp. 61–123.
- [25] C. E. Van Wagner, “Height of crown scorch in forest fires,” *Can. J. For. Res.*, vol. 3, Sept., pp. 373–378, 1973.
- [26] R. V. Soares, et al., *Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo*, 2. ed. rev. Curitiba, Paraná, Brasil.: Gráfica Capital, 2017.

- [27] C. M. Countryman, "The nature of heat," Portland: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1977.
- [28] A. C. Batista, et al. "Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliottii*," *Rev. Arvore*, vol. 37, no. 5, Oct., pp. 779–787, 2013. doi. [10.1590/S0100-67622013000500001](https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500001)
- [29] V. Londe de Camargos, G. Assunção Ribeiro, F. A. da Silva, S. V. Martins, and M. F. da Silva Carmo, "Estudo do comportamento do fogo em um trecho de floresta estacional semidecídua no município de Viçosa, Minas Gerais," *Ciência Florest.*, vol. 25, no. 3, Sept., pp. 537–545, 2015. doi.[10.5902/1980509819605](https://doi.org/10.5902/1980509819605)
- [30] IBM Corp., "IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0." Armonk, NY: IBM Corp., 2013.
- [31] D. A. McGranahan, et al. "Weather and Fuel as Modulators of Grassland Fire Behavior in the Northern Great Plains," *Environ. Manage.*, vol. 71, Dec., pp. 940–949, 2023. doi. [10.1007/s00267-022-01767-9](https://doi.org/10.1007/s00267-022-01767-9)