

Efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en quemas controladas para limpieza de terrenos

Effects of meteorological and fuel variables on fire behavior in controlled burns for land clearing

 <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v9.n2.2025.137-151>

Recibido: 10-02-2025

Aceptado: 11-03-2025

Publicado: 25-05-2025

Marcos Pedro Ramos-Rodríguez^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0003-0992-8414>

Alexandra Claribel Mero-Santana⁴

 <https://orcid.org/0009-0008-3707-8086>

Rosa Gisela Azuero-Sarango²

 <https://orcid.org/0009-0006-9389-0111>

Jandry Jair Baque-Suarez³

 <https://orcid.org/0009-0007-3314-2848>

1. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.
2. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.
3. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.
4. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.

Volumen: 9

Número: 2

Año: 2025

Paginación: 137-151

URL: <https://revistas.unesum.edu.ec/index.php/unesumciencias/article/view/892>

***Correspondencia autor:** marcos.ramos@unesum.edu.ec

RESUMEN

El tiempo atmosférico y los combustibles afectan el comportamiento del fuego durante el desarrollo de quemadas controladas. Este trabajo se realizó en el recinto Estero Hondo, cantón Jipijapa, Manabí, Ecuador, con el objetivo de analizar los efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en quemadas controladas para limpieza de terrenos. Se delimitaron 15 parcelas de 5 m de largo y un ancho medio de 1,82 m ubicadas sobre hileras de combustibles. Las variables peso seco, espesura y humedad del material combustible se midieron antes de la quema y durante la misma, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Los parámetros del comportamiento del fuego estimados fueron altura de las llamas, velocidad de propagación, intensidad lineal del fuego, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área. Las condiciones promedio durante la quema fueron: temperatura de 30,93 °C, humedad relativa del 54,96 %, velocidad del viento de 0,90 m.s⁻¹, peso seco del combustible de 2,19 kg.m², espesura de 42,02 cm y contenido de humedad del 39,55 %. Los valores medios de altura de llamas, velocidad de propagación, intensidad lineal y altura de secado letal fueron 1,20 m, 0,0223 m.s⁻¹, 150,18 kcal.m⁻¹.s⁻¹ y 10,87 m, respectivamente. El peso seco del combustible y la humedad demostraron influir de manera sinérgica en la intensidad lineal y el calor liberado, confirmando la necesidad de considerar estas variables de forma conjunta en la planificación de quemadas controladas.

Palabras clave: Incendios forestales, Manejo del fuego, Prevención de incendios, Uso del fuego.

ABSTRACT

Weather and fuels affect fire behavior during controlled burns. This work was carried out in the Estero Hondo site, Jipijapa canton, Manabí, Ecuador, with the objective of analyzing the effects of meteorological and fuel variables on fire behavior in controlled burns for land clearing. 15 plots of 5 m length and an average width of 1.82 m were delimited, located on rows of fuels. The variables dry weight, thickness and humidity of the combustible material were measured before and during the burn, as well as air temperature, relative humidity and wind speed. The estimated fire behavior parameters were flame height, propagation speed, linear fire intensity, lethal drying height and heat released per unit area. The average conditions during burning were: temperature of 30.93 °C, relative humidity of 54.96%, wind speed of 0.90 m.s⁻¹, dry fuel weight of 2.19 kg.m², thickness of 42.02 cm and moisture content of 39.55%. The average values of flame height, spread speed, linear fire intensity and lethal drying height were 1.20 m, 0.0223 m.s⁻¹, 150.18 kcal.m⁻¹.s⁻¹ and 10.87 m, respectively. Fuel dry weight and moisture content were shown to synergistically influence linear fire intensity and heat released, confirming the need to consider these variables jointly when planning controlled burns.

Keywords: Forest fires, Fire management, Fire prevention, Use of fire.



Creative Commons Attribution 4.0
International (CC BY 4.0)

Introducción

Los incendios forestales y las quemas controladas son fenómenos ampliamente estudiados debido a su impacto significativo en los ecosistemas, la biodiversidad y el uso del suelo. A escala global, la frecuencia y severidad de estos eventos han ido en aumento, vinculados principalmente a factores climáticos, de combustibles y a la acción humana. En el *United Nations Environment Programme* (2022) se advierte que el riesgo de incendios extraordinarios está en constante crecimiento, con predicciones que indican un incremento del 50% en su frecuencia hacia finales del siglo. Esta situación representa un desafío crítico tanto a nivel ambiental como socioeconómico, especialmente en regiones dependientes del uso de la tierra para actividades agrícolas y forestales. Al respecto (MacCarty et al., 2023) señalaron que en 2023 el mundo vio una mayor actividad de incendios, incluidas áreas quemadas sin precedentes en todo Canadá e incendios catastróficos en Hawái.

En América Latina, las quemas controladas constituyen una práctica ancestral y comúnmente utilizada para la limpieza de terrenos con fines agrícolas o forestales. De acuerdo con un estudio realizado en la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas, México, los campesinos aseguraron que la quema cumple varias funciones: a) aumento de la fertilidad, ya que se cree que nutre la tierra, y así crece mejor el maíz; b) ahorro de trabajo, ya que aplicar fuego no cuesta nada, y requiere poca inversión de energía y tiempo, y se hace en un día; c) control de plagas, dado que el fuego es un gran controlador de plagas, además de barato (Gutiérrez Navarro et al., 2017). También en la provincia de Manabí, al igual que en otras regiones de Ecuador, el fuego es muy utilizado por los productores agrícolas (Ramos-Rodríguez et al., 2021a). No obstante, su aplicación inadecuada puede desencadenar incendios no deseados, alterando el equilibrio ecológico y afectando las propiedades físico-químicas del suelo (Fra-

goso-Servón et al., 2022). En este contexto, es crucial comprender las variables meteorológicas y las características del combustible que influyen en el comportamiento del fuego durante estas actividades. Dicho análisis permite optimizar la planificación y ejecución de las quemas, minimizando los impactos negativos sobre el medio ambiente y la sociedad.

Diversos estudios han abordado el comportamiento del fuego en distintas condiciones ambientales y tipos de combustible. Por ejemplo, Batista et al. (2013) estimaron el comportamiento del fuego en *Pinus elliottii* bajo condiciones experimentales, demostrando la influencia de las variables meteorológicas en la propagación de las llamas. De manera similar, Ramos Rodríguez et al. (2019) analizaron el comportamiento del fuego en plantaciones de *Tectona grandis* en Jipijapa, Ecuador, concluyendo que la humedad del combustible y la velocidad del viento son determinantes clave en la intensidad del fuego. Otros estudios, como los realizados por Cheney et al. (2012) en eucaliptales secos de Australia y Seger et al. (2013) en vegetación de estepa en Brasil, coinciden en que las condiciones climáticas y el tipo de combustible tienen un papel preponderante en la velocidad y dirección de la propagación del fuego.

En Ecuador, el uso del fuego para la limpieza de terrenos es una práctica común, especialmente en zonas rurales de la región Costa y Sierra. Manrique-Toala et al. (2022) analizaron el uso del fuego en tierras forestales de Jipijapa, Manabí, concluyendo que, si bien es una herramienta de bajo costo, su mal manejo puede ocasionar la degradación del suelo y pérdida de biomasa. Ramos-Rodríguez et al. (2021b) estudiaron la ocurrencia de incendios en el cantón Santa Ana, Manabí, identificando patrones recurrentes asociados a temporadas secas prolongadas y al incremento de temperaturas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de contar con estudios que analicen detalladamente las variables involucradas en el

comportamiento del fuego durante las quemas controladas, con el objetivo de reducir el riesgo de que las mismas se conviertan en incendios forestales.

A nivel internacional, el aumento en la frecuencia de incendios ha sido asociado al cambio climático. Aponte et al. (2016) señalaron que el incremento en las temperaturas y la prolongación de las estaciones secas favorecen condiciones óptimas para la ignición y propagación del fuego. Westerling (2016) corroboró esta tendencia en los bosques del oeste de los Estados Unidos, donde los incendios forestales han aumentado significativamente en las últimas décadas debido a cambios en el calendario de la primavera y a una mayor disponibilidad de combustible seco. En el ámbito local, Calahorrano (2024) realizó un análisis espacial y temporal de incendios en Ecuador, evidenciando un incremento en la frecuencia de estos eventos, especialmente en zonas con alta presión agrícola y forestal.

El comportamiento del fuego durante las quemas controladas depende de múltiples factores, siendo las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) y las características del combustible (humedad, cantidad y disposición) las más relevantes (Quissindo, 2018; Ramos Rodríguez et al., 2024). Gomes et al. (2020) estudiaron el comportamiento del fuego en diferentes ecosistemas del Cerrado brasileño, destacando que la altura y densidad del combustible son factores determinantes en la intensidad y velocidad de propagación de las llamas. De igual forma, Cruz et al. (2021), demostraron que la altura del combustible en pastizales influye directamente en la propagación horizontal del fuego.

En este marco, resulta fundamental analizar los efectos combinados de las variables meteorológicas y del combustible en el comportamiento del fuego durante quemas controladas, especialmente en contextos locales donde estas prácticas son habituales.

Carrión-Paladines et al. (2023) demostraron que los incendios de baja severidad pueden tener efectos positivos en las propiedades físico-químicas del suelo en ecosistemas de páramo en Ecuador, mientras que Ramos-Rodríguez et al. (2024) encontraron que el fuego puede mejorar las características nutricionales del suelo si se maneja adecuadamente. No obstante, Huaman Cardenas (2021) advirtió que el uso inapropiado del fuego puede provocar pérdida de fertilidad y alteraciones significativas en la estructura del suelo.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente señalado el presente estudio tuvo el objetivo de analizar los efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en quemas controladas para limpieza de terrenos. La relevancia de esta investigación radica en su contribución al manejo sostenible del fuego como herramienta de gestión agrícola y forestal, ofreciendo información científica que permita optimizar las quemas controladas y minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente. Además, los resultados obtenidos serán útiles para el diseño de estrategias de prevención y mitigación de incendios en regiones como Manabí, Ecuador, donde el uso del fuego es una práctica común. La comprensión de las variables meteorológicas y del combustible es esencial para predecir el comportamiento del fuego y garantizar el éxito de las quemas controladas. Estudios previos han evidenciado la necesidad de integrar factores ambientales y técnicos en el diseño de planes de manejo del fuego, con el fin de lograr un equilibrio entre la productividad agrícola y la conservación de los ecosistemas (Ramos-Rodríguez et al., 2021b; Wanchuk et al., 2024). En este sentido, la presente investigación busca aportar conocimiento valioso que fortalezca la toma de decisiones en el manejo del fuego en Ecuador y otros contextos similares.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en tierras de vocación forestal en el recinto Estero Hondo cantón Jipijapa, utilizadas para el cultivo de *Zea mays* L. (maíz), cuyos desechos junto a vegetación herbácea son quemados cada año como práctica de limpieza del suelo antes de la próxima siembra. El cantón Jipijapa se localiza en el extremo sur occidental de la Provincia de Manabí, a 403 km de Quito, capital de Ecuador. Dicho cantón limita al norte por los cantones Montecristi, Portoviejo y Santa Ana, al sur con la provincia de Santa Elena y el cantón Puerto López, al este con los cantones Paján y 24 de Mayo y al oeste con el Océano Pacífico. El sitio Estero Hondo se encuentra a una distancia de 3,7 km al norte de la cabecera cantonal de Jipijapa por la vía a Portoviejo.

Delimitación del área experimental

Considerando que en las tierras de vocación forestal del recinto Estero Hondo por lo general los campesinos queman los residuos de cosecha de *Zea mays* L. y la vegetación herbácea que los acompaña apilándolos en hilera o rollos, se delimitaron 15 parcelas de 5 m de largo y un ancho medio de 1,82 m ubicadas una a continuación de la otra sobre hileras o rollos de desechos o combustibles.

Caracterización de variables meteorológicas y del combustible

La caracterización de las variables meteorológicas se realizó a partir de mediciones de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento durante la quema de las parcelas. Se utilizó un medidor meteorológico digital Ambient weather WM-4 de fabricación China realizándose una medición al iniciar 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 la misma. Estas mediciones se realizaron a 0,50 m de altura del suelo y a una distancia hasta la cual no llegara el calor del fuego.

Para caracterizar las variables del material combustible se obtuvieron informaciones sobre peso, espesura 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 utilizado por Cruz et al. (2020). De acuerdo con esto en el centro de cada una de las parcelas ubicadas en las hileras de combustibles se colectaron muestras de 2 500 cm² delimitada por un cuadro de madera de 50 x 50 cm, de cuyo interior se retiró todo el material. En todos los casos 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 (pancas) y de herbáceas con diámetros superiores a 0,7 cm. El material colectado en cada parcela se pesó con una balanza de gancho de 0,01 g de precisión, tomándose del mismo una muestra de 80 g la cual fue colocada en fundas de nailon 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 por 48 horas, siguiendo a Seger et al. (2013, 2016).

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. La humedad de los combustibles se determinó para cada parcela a través de la Ecuación 1 (Čekovská et al., 2017).

$$w = \frac{m_w - m_o}{m_o} * 100 \quad (1)$$

Dónde: w, contenido de humedad de la muestra (%); mw, peso húmedo de la muestra (kg); mo, peso de la muestra después del secado en la estufa (kg).

Estimación de parámetros del comportamiento del fuego

La estimación de los parámetros del comportamiento del fuego se basó en la medición de la altura de las llamas, velocidad de propagación, intensidad lineal del fuego, altura de secado letal y calor liberado por unidad de área cuyas unidades de medida se muestran en la Tabla 1. En todos los casos se utilizó la técnica de quema a favor del viento. Las parcelas fueron quemadas en horas de la mañana, del medio día y de la tarde. La altura de las llamas se midió en cada parcela a 1; 2,5 y 4 m del extremo por donde se inició la quema con una baliza graduada, es decir, tres mediciones en cada parcela ubicada en las hileras de combustible. La velocidad de propagación del fuego se calculó midiendo el tiempo utilizado por el fuego para recorrer cada parcela (m.s-1) considerando esto cuando el 50 % de la línea de fuego llegó al final de la parcela.

La intensidad lineal del fuego (Byram, 1959), la altura de secado letal (Van 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.

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

$$= \frac{3,94 * I^{7/6}}{(0,107 * I + V^3)^{1/2} (60 - T)} \quad (3)$$

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

Dónde: I, intensidad lineal del fuego en kcal.m-1.s-1; H, calor de combustión en kcal.kg-1 (± 4000 kcal.kg-1); w, peso del combustible disponible en kg.m-2; r, velo-

cidad de propagación del fuego en m.s-1; hs, altura de secado letal en m; V, velocidad del viento en m.s-1; T, temperatura del aire en °C; Ha, calor liberado por unidad de área en kcal.m-2. La constante 60 se expresa en °C y está asociada a la temperatura del aire 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 (Soares et al., 2017). Se consideró un calor de combustión seco de 4 000 kcal.kg-1 (16 720 kJ.kg-1) el cual han utilizado, entre otros, Ramos Rodríguez et al. (2019; 2024). Batista et al. (2013) utilizaron en quemas experimentales en *Pinus elliotii* un valor medio de $H = 15\,490$ kJ.kg-1 de acuerdo a determinaciones hechas por Soares y Hakkila (1987). Londe de Camargo et al. (2015), determinaron valores de poder calorífico seco entre 4 093 y 4 623 kcal.kg-1 (17 136,63 y 19355,65 kJ.kg-1) en un bosque estacional semideciduo.

$$Hw = Hd \left[\frac{100 - U / 7}{100 + U} \right] \quad (5)$$

Dónde: Hw, calor de combustión del material húmedo; Hd, calor de combustión del material seco; U, contenido de humedad del material combustible en %.

En la Tabla 1 se presentan y describen las variables utilizadas en la investigación, relacionadas ellas con el comportamiento del fuego, las condiciones meteorológicas y el material combustible.

Tabla 1.

Variables utilizadas en la investigación

Variab	Descripción	Unidad
T	Temperatura del aire	°C
Hr	Humedad relativa	%
Vv	Velocidad del viento	m.s ⁻¹
PcA	Peso del material combustible seco antes de la quema	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	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	kcal.m^{-2}

Correlación entre variables

Para determinar la relación entre las variables utilizadas en la investigación se utilizaron los valores medios correspondientes a cada parcela de quema. De acuerdo con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks se verificó el ajuste de cada variable a la distribución normal ($p < 0,05$). En atención a este comportamiento se determinó el coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman o el coeficiente de correlación de

Pearson considerando en ambos casos una probabilidad de significación del 5 % como medida de la relación. La interpretación de la magnitud de la correlación se realizó de acuerdo con la propuesta de Bisquerra Alzina (2009) para la correlación de Spearman (Tabla 2) y la sugerencia de Cohen para el caso de la correlación de Pearson (Tabla 3). El procesamiento de los datos se realizó con el SPSS Statistics for Windows (Versión 22.0) (IBM Corp. 2013).

Tabla 2.

Interpretación de la magnitud del coeficiente de correlaciones de Spearman

Valor de r	Interpretación
0,00 – 0,20	Prácticamente nula
0,21 – 0,40	Baja
0,41 – 0,70	Moderada
0,71 – 0,90	Alta
0,91 – 1,00	Muy alta

Tabla 3.

Interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Pearson según sugerencia de Cohen

Valor de r	Interpretación
0,00 – 0,10	Nula
0,10 – 0,30	Débil
0,30 – 0,50	Moderada
0,50 – 1,00	Fuerte

Resultados

Caracterización de variables meteorológicas y del combustible

La caracterización de las variables meteorológicas y del combustible relacionada con la investigación el día de la quema en cada parcela de quema se muestra en la Tabla 4. Los valores obtenidos fueron para la temperatura del aire $30,93 \pm 1,30$ °C, para la humedad relativa $54,96 \pm 2,49$ % y

para la velocidad del viento $0,90 \pm 0,31$ m/s. En sentido general existió poca variabilidad de los valores expresado esto en los bajos valores de desviación estándar.

Los valores obtenidos para las variables del combustible fueron: peso seco del material combustible antes de la quema $2,19 \pm 1,22$ kg.m⁻², espesura de la capa de combustible antes de la quema $42,02 \pm 7,36$ cm y humedad de los combustibles $39,55 \pm 12,90$ %.

Tabla 4.

Variables meteorológicas y del combustible el día de la quema en cada parcela experimental

Parcelas	Variables meteorológicas			Variables del combustible		
	T (°C)	Hr (%)	Vv (m.s ⁻¹)	PcA (kg.m ⁻²)	EspA (cm)	Hc (%)
1	27,37	60,03	1,03	1,34	40,00	56,67
2	31,80	54,37	0,50	1,18	34,67	52,99
3	31,93	52,97	0,50	1,62	34,00	50,18
4	32,33	52,27	1,17	1,81	32,67	43,75
5	30,47	57,4	1,00	0,89	43,00	58,03
6	29,30	59,03	1,10	1,74	41,67	52,66
7	30,30	56,8	0,67	1,68	37,33	31,03
8	31,73	53,13	0,57	1,40	34,67	34,30
9	31,50	53,77	1,03	2,76	37,00	23,30
10	30,33	56,67	1,00	1,78	42,33	40,00
11	31,23	52,53	0,97	2,12	55,33	45,18
12	30,73	55,67	1,17	2,95	46,33	27,29
13	32,40	53,17	1,60	4,94	46,33	25,71
14	30,97	54,07	0,63	1,80	55,00	33,70
15	31,63	52,60	0,63	4,89	50,00	18,57
Media	30,93	54,96	0,90	2,19	42,02	39,55
± ds	1,30	2,49	0,31	1,22	7,36	12,90

Nota: 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.

Parámetros del Comportamiento del Fuego

Los valores obtenidos para los parámetros del comportamiento del fuego evaluados en la investigación se muestran en la Tabla 5. Se observa valores medios para la altura de llamas de 1,20 m, velocidad de propagación del fuego de 0,0223 m.s⁻¹, intensidad lineal de 150,18 kcal.m⁻¹. s⁻¹, altura de secado le-

tal 10,87 m y calor liberado por unidad de área de 6266,04 kcal.m⁻², respectivamente, mostrándose la mayor dispersión de los datos respecto a la media para la intensidad lineal y el calor liberado por unidad de área. Las alturas de secado letal estimadas en cada parcela de quema muestran valores entre 4,53 y 24,73 metros.

Tabla 5.

Valores de los parámetros del comportamiento del fuego en cada parcela de quema

Parcelas	Hll (m)	Vpf (m.s ⁻¹)	I		hs (m)	Ha (kcal.m ⁻²)
			(kcal.m ⁻¹ . s ⁻¹)	(kw.m ⁻¹)		
1	1,09	0,0167	52,27	218,63	4,72	3135,98
2	0,83	0,0167	47,40	198,28	5,53	2844,01
3	1,03	0,0139	55,49	232,11	6,18	3995,04
4	1,12	0,0278	131,07	548,27	10,65	4718,46
5	1,22	0,0208	42,95	179,64	4,53	2061,37
6	1,35	0,0208	88,08	368,46	7,27	4227,97
7	0,98	0,0278	136,10	569,32	10,62	4899,65
8	1,32	0,0208	82,61	345,57	8,00	3965,30
9	1,00	0,0167	144,17	603,09	11,23	8650,34
10	0,85	0,0208	99,71	417,09	8,35	4786,05
11	1,71	0,0278	152,13	636,36	11,61	5476,57
12	1,29	0,0278	247,58	1035,64	16,99	8912,85
13	1,42	0,0278	420,28	1758,05	23,44	15129,91
14	1,36	0,0208	106,68	446,26	9,23	5120,69

15	1,46	0,0278	446,29	1866,88	24,73	16066,50
Media	1,20	0,0223	150,18	628,24	10,87	6266,04
± ds	0,24	0,0050	126,54	529,36	6,25	4221,43

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.

Análisis de Correlación

En el caso de las variables meteorológicas y las del combustible solo se obtuvo relación lineal significativa entre humedad relativa y altura de secado letal ($p=0,032$; $r=-0,554$) (Tabla 6). Entre variables del combustible y del comportamiento del fuego se obtuvo correlación entre peso seco del combustible e intensidad lineal ($p=0,000$; $r=0,954$), peso seco del combustible y altura de secado letal ($p=0,000$; $r=0,954$), peso seco del combustible y calor liberado por unidad de área ($p=0,000$; $r=0,961$), espesura del combustible y altura de las llamas ($p=0,002$; $r=0,726$), humedad del combustible

e intensidad lineal ($p=0,000$; $r=-0,857$), humedad del combustible y altura de secado letal ($p=0,000$; $r=-0,864$) y humedad del combustible y calor liberado por unidad de área ($p=0,000$; $r=-0,882$) (Tabla 7). En el caso de las variables del comportamiento del fuego se obtuvo correlación moderada entre la velocidad de propagación e intensidad lineal ($p=0,002$; $r=0,731$), velocidad de propagación y altura de secado letal ($p=0,040$; $r=0,731$), intensidad lineal y altura de secado letal ($p=0,00$; $r=0,989$), intensidad lineal y calor liberado por unidad de área ($p=0,000$; $r=0,975$), y entre altura de secado letal y calor liberado por unidad de área ($p=0,000$; $r=0,957$) (Tabla 8).

Tabla 6.

Correlación de Pearson (P) o de Spearman (S) entre variables meteorológicas y del comportamiento del fuego

Variables	R	P
Temperatura – Altura de las llamas (S)	0,139	0,621
Temperatura – Velocidad de propagación (S)	0,083	0,769
Temperatura – Intensidad lineal (S)	0,229	0,413
Temperatura – Altura de secado letal (S)	0,339	0,216
Temperatura – Calor liberado por unidad de área (S)	0,193	0,491
Humedad relativa – Altura de las llamas (P)	-0,285	0,303
Humedad relativa – Velocidad de propagación (S)	-0,306	0,268
Humedad relativa – Intensidad lineal (S)	-0,461	0,084
Humedad relativa – Altura de secado letal (S)	-0,554*	0,032
Humedad relativa – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,400	0,140
Velocidad del viento – Altura de las llamas (P)	0,245	0,378
Velocidad del viento – Velocidad de propagación (S)	0,411	0,128
Velocidad del viento – Intensidad lineal (S)	0,378	0,164
Velocidad del viento – Altura de secado letal (S)	0,341	0,214
Velocidad del viento – Calor liberado por unidad de área (S)	0,330	0,230

Nota: ** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas). * La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Tabla 7.

Correlación de Pearson (P) o de Spearman (S) entre variables del combustible y del comportamiento del fuego

Variables	r	P
Peso seco del combustible – Altura de las llamas (S)	0,511	0,052
Peso seco del combustible – Velocidad de propagación (S)	0,610*	0,016
Peso seco del combustible – Intensidad lineal (S)	0,954**	0,000
Peso seco del combustible – Altura de secado letal (S)	0,954**	0,000
Peso seco del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	0,961**	0,000
Espesura del combustible – Altura de las llamas (P)	0,726**	0,002
Espesura del combustible – Velocidad de propagación (S)	0,473	0,075
Espesura del combustible – Intensidad lineal (S)	0,487	0,066
Espesura del combustible – Altura de secado letal (S)	0,440	0,101
Espesura del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	0,549*	0,034
Humedad del combustible – Altura de las llamas (P)	-0,226	0,419
Humedad del combustible – Velocidad de propagación (S)	-0,476	0,073
Humedad del combustible – Intensidad lineal (S)	-0,857**	0,000
Humedad del combustible – Altura de secado letal (S)	-0,864**	0,000
Humedad del combustible – Calor liberado por unidad de área (S)	-0,882**	0,000

Nota: ** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas). * La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Tabla 8.

Correlación de Pearson (P) o de Spearman (S) entre variables del comportamiento del fuego

Variables	r	p
Altura de las llamas – Velocidad de propagación (S)	0,534*	0,040
Altura de las llamas – Intensidad lineal (S)	0,500	0,058
Altura de las llamas – Altura de secado letal (P)	0,482	0,069
Altura de las llamas – Calor liberado por unidad de área (S)	0,475	0,074
Velocidad de propagación – Intensidad lineal (S)	0,731**	0,002
Velocidad de propagación – Altura de secado letal (S)	0,731**	0,040
Velocidad de propagación – Calor liberado por unidad de área (S)	0,610*	0,016
Intensidad lineal – Altura de secado letal (S)	0,989**	0,000
Intensidad lineal – Calor liberado por unidad de área (S)	0,975**	0,000
Altura de secado letal – Calor liberado por unidad de área (S)	0,957**	0,000

Nota: ** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas). * La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Los análisis de regresión realizado (Figura 3, 4 y 5) muestran una relación positiva entre el peso seco del combustible e intensidad

lineal, para el peso seco del combustible y altura de secado letal, como entre espesura del combustible y alturas de llamas.

Figura 3.

Análisis de regresión entre el peso seco del combustible y la intensidad lineal

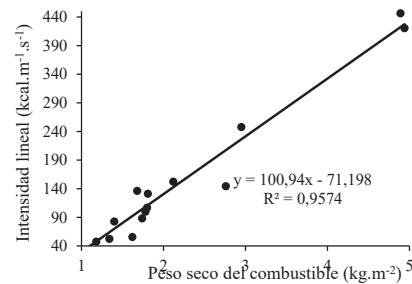


Figura 4.

Análisis de regresión entre el peso seco del combustible y la altura de secado letal

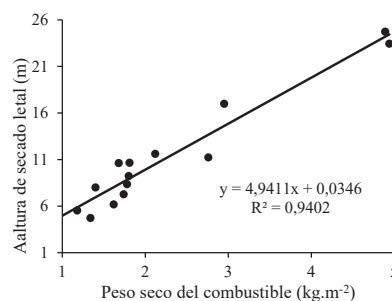
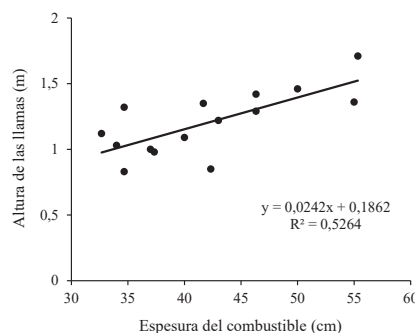


Figura 5.

Análisis de regresión entre la espesura del combustible y la altura de las llamas



Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten entender de manera integral cómo las variables meteorológicas y del combustible afectan el comportamiento del fuego en quemas controladas para la limpieza de terrenos. Estas prácticas, aunque ampliamente utilizadas en el ámbito agrícola y forestal, requieren un manejo preciso y fundamentado para minimizar riesgos y maximizar beneficios. Ernst et al (2015)

afirman que, en ambientes propensos a la ocurrencia de fuegos, que son manejados con quemas controladas para reducir los riesgos de incendios, debe tenerse en cuenta la cantidad, distribución y tipo de combustible, tanto como la relación entre temperatura y tiempo de exposición al fuego. Carrión-Paladines et al. (2023) sugieren desarrollar modelos predictivos que consideren la interacción datos meteorológicos y características del combustible para optimi-

zar el manejo del fuego en contextos agrícolas y forestales.

Variables meteorológicas

Los datos registrados durante las quemas mostraron una temperatura promedio del aire de $30,93 \pm 1,30$ °C, una humedad relativa de $54,96 \pm 2,49$ % y una velocidad del viento de $0,90 \pm 0,31$ m.s⁻¹. Estos valores representan condiciones favorables para la propagación del fuego, tal como lo han señalado estudios previos en los que temperaturas superiores a 30 °C y humedades relativas por debajo del 60 % incrementan el riesgo de incendios (Batista et al., 2013; Cheney et al., 2012). La baja variabilidad observada en estos parámetros indica que las condiciones ambientales fueron consistentes entre las parcelas experimentales, permitiendo una evaluación uniforme de sus efectos.

La correlación negativa entre la humedad relativa y la altura de secado letal ($p = 0,032$; $r = -0,554$) destaca la importancia de este parámetro como regulador natural del comportamiento del fuego. Una menor humedad relativa facilita la transferencia de calor, favoreciendo una mayor altura de secado letal. Este hallazgo está alineado con lo reportado por Gomes et al. (2020), quienes documentaron que la reducción de la humedad atmosférica incrementa la energía disponible para la combustión, lo que resulta en una mayor afectación vertical de la vegetación.

En contraste, la velocidad del viento no mostró correlaciones estadísticamente significativas con los parámetros evaluados ($p > 0,05$). Sin embargo, investigaciones como las de Cruz et al. (2021) han demostrado que vientos superiores a 1 m/s pueden incrementar la velocidad de propagación y la longitud de las llamas, lo cual subraya la necesidad de considerar este factor en estudios con mayor variabilidad en las condiciones de viento.

Características del combustible

Los combustibles evaluados presentaron un peso seco promedio de $2,19 \pm 1,22$ kg.m⁻²,

una espesura de capa de $42,02 \pm 7,36$ cm y un contenido de humedad de $39,55 \pm 12,90$ %. Estas variables demostraron ser determinantes en el comportamiento del fuego, mostrando correlaciones significativas con varios de los parámetros evaluados. Por ejemplo, el peso seco del combustible tuvo una fuerte correlación positiva con la intensidad lineal del fuego ($p = 0,000$; $r = 0,954$) y con el calor liberado por unidad de área ($p = 0,000$; $r = 0,961$), lo que refuerza la importancia de la cantidad de biomasa disponible en la generación de energía durante la quema. Resultados similares han sido documentados por Ramos Rodríguez et al. (2019) y Seger et al. (2013), quienes concluyeron que una mayor carga de combustible aumenta la intensidad del fuego y, por ende, su impacto.

La humedad del combustible mostró una relación inversa significativa con la intensidad lineal ($p = 0,000$; $r = -0,857$) y el calor liberado por unidad de área ($p = 0,000$; $r = -0,882$). Este hallazgo es consistente con lo expuesto por Quissindo (2018), quien destacó que combustibles con alto contenido de humedad requieren mayor energía para evaporar el agua antes de iniciar la combustión, reduciendo la energía disponible para la propagación del fuego. Además, la humedad del combustible también influyó negativamente en la altura de secado letal ($p = 0,000$; $r = -0,864$), lo que subraya su papel como un amortiguador natural en el impacto vertical del fuego.

Por otro lado, la espesura del combustible estuvo positivamente correlacionada con la altura de las llamas ($p = 0,002$; $r = 0,726$), lo que indica que una mayor profundidad de la capa de combustible favorece el desarrollo vertical del fuego. Este resultado coincide con las observaciones de Batista et al. (2013), quienes demostraron que capas más densas de material combustible generan llamas más altas debido a la mayor concentración de material inflamable en un área reducida.

Comportamiento del fuego

Los parámetros del fuego evaluados incluyeron la altura de las llamas, la velocidad

de propagación, la intensidad lineal, la altura de secado letal y el calor liberado por unidad de área. La altura promedio de las llamas fue de $1,20 \pm 0,24$ m, lo que refleja una intensidad moderada, mientras que la velocidad de propagación promedio de $0,0223 \pm 0,0050$ m.s⁻¹ sugiere un desplazamiento controlado del fuego. Estos valores son consistentes con quemas realizadas en condiciones similares en otros estudios, como el de Ramos-Rodríguez et al (2024).

La intensidad lineal del fuego ($150,18 \pm 126,54$ kcal.m⁻¹.s⁻¹) presentó una alta dispersión, lo que indica variabilidad en la energía liberada entre las parcelas. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en las características del combustible, particularmente en el peso seco y la humedad, como lo confirman las correlaciones significativas encontradas en este estudio. Según Carrión-Paladines et al. (2023), estas variaciones pueden tener implicaciones importantes en la afectación ecológica del fuego, especialmente en ecosistemas sensibles como los páramos.

La altura de secado letal alcanzó un promedio de $10,87 \pm 6,25$ m, con valores extremos que oscilaron entre 4,53 y 24,73 m. Este parámetro es particularmente relevante para evaluar el impacto vertical del fuego y su potencial para dañar la vegetación de mayor porte. La correlación significativa entre la altura de secado letal y la intensidad lineal ($p = 0,000$; $r = 0,989$) sugiere que, a mayor energía liberada, mayor es el alcance del fuego en el dosel, lo que ha sido documentado también por Aponte et al. (2016).

El calor liberado por unidad de área fue otro parámetro clave, con un valor promedio de $6266,04 \pm 4221,43$ kcal.m⁻². Este indicador de la energía total generada durante la quema está estrechamente relacionado con el peso seco del combustible ($p = 0,000$; $r = 0,961$), como también lo han reportado Seger et al. (2013) y Ramos Rodríguez et al. (2019). Una mayor carga de combustible se traduce en una mayor liberación de ener-

gía, lo que puede tener implicaciones tanto positivas como negativas dependiendo del objetivo de la quema.

Conclusiones

Las quemas controladas son una herramienta valiosa para la gestión de terrenos, pero requieren un manejo fundamentado en el conocimiento científico para maximizar sus beneficios y minimizar los riesgos asociados. El presente estudio aporta evidencia fundamental sobre los efectos de las variables meteorológicas y las características del combustible en el comportamiento del fuego durante quemas controladas para la limpieza de terrenos.

La temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento son determinantes clave en el comportamiento del fuego. Se identificó que la variable menos estable durante el día fue la humedad relativa, así como una correlación negativa entre la humedad relativa y la altura de secado letal, lo que subraya que condiciones de baja humedad incrementan el alcance vertical del fuego.

Las características del combustible, como su peso seco, espesura y contenido de humedad, tienen una influencia directa y significativa sobre parámetros críticos del fuego, como la intensidad lineal, la altura de las llamas y el calor liberado por unidad de área. Combustibles con alto peso seco y baja humedad promueven una mayor intensidad y propagación del fuego. Esto sugiere implementar estrategias para reducir la carga de combustible aumentando el ancho de las hileras de combustible o quemando el combustible sin ser apilado, es decir, disperso en el área que se desea limpiar.

Se evidenció una interdependencia entre las variables estudiadas. Por ejemplo, el peso seco del combustible y la humedad demostraron influir de manera sinérgica en la intensidad lineal y el calor liberado, confirmando la necesidad de considerar estas variables de forma conjunta en la planificación de quemas controladas.

Los parámetros del comportamiento del fuego evaluados, como la intensidad lineal y el calor liberado, presentaron una alta dispersión, atribuible a las diferencias en las características del combustible y las condiciones meteorológicas locales. Esto resalta la importancia de ajustar las prácticas de quema a las condiciones específicas de cada sitio.

Los hallazgos de este estudio abren nuevas oportunidades para optimizar las prácticas de quemas controladas mediante la incorporación de las relaciones observadas entre variables meteorológicas, del combustible y del comportamiento del fuego en modelos computacionales lo que permitirá predecir de manera más precisa los resultados de estas prácticas. También es necesario realizar estudios adicionales en diferentes localidades y condiciones climáticas para refinar los resultados obtenidos y adaptarlos a contextos específicos. Puede considerarse aumentar el número de parcelas y su longitud, así como quemar varias de ellas durante todas las horas del día.

Bibliografía

- Aponte, C., de Groot, W. J., & Wotton, B. M. (2016). Forest fires and climate change: causes, consequences and management options. *International Journal of Wildland Fire*, 25(8), 861–875. https://doi.org/10.1071/WFv25n8_FO
- Batista, A. C., Beutling, A., & Pereira, J. F. (2013). Estimativa do comportamento do fogo em queimas experimentais sob povoamentos de *Pinus elliotii*. *Revista Arvore*, 37(5), 779–787. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500001>
- Bisquerra Alzina, R. (2009). Metodología de la investigación educativa (Segunda ed). La Muralla, S.A. <https://acortar.link/XkZfs>
- Calahorrano, J. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos Spatial and Temporal Analysis of Wildfires in Ecuador. *Colombia Forestal*, 27(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2256201X.20111>
- 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/fire6120447>
- Cheney, N. P., Gould, J. S., McCaw, W. L., & Anderson, W. R. (2012). Predicción del comportamiento del fuego en el bosque seco de eucaliptos del sur de Australia. *Ecología y Gestión Forestal*, 215, 120–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.012>
- Cruz, M. G., Sullivan, A. L., & Gould, J. S. (2021). The effect of fuel bed height in grass fire spread: Addressing the findings and recommendations of Moinuddin et al. (2018). *International Journal of Wildland Fire*, 30(3), 215–220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/WF19186>
- Ernst, R., Morici, E., Estelrich, H. D., Muiño, W. A., & Ruiz, M. A. (2015). Efectos de la quema controlada sobre el banco de semillas de diferentes parches del bosque de caldén en la región semiárida central Argentina. *Archivos de Zootecnia*, 64(247), 245–254. <https://doi.org/10.21071/az.v64i247.404>
- Fragoso-Servón, P., Corona, A. P., & Hernández, B. P. (2022). Efecto del fuego sobre las propiedades de los suelos agrícolas en la Zona Kárstica del sur de Quintana Roo. *European Scientific Journal ESJ*, 11, 406–423. <https://doi.org/10.19044/esj-preprint.11.2022.p406>
- Gomes, L., Miranda, H. S., Silvério, D. V., & Bustamante, M. M. C. (2020). Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 458. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117804>
- Gutiérrez Navarro, A., García Barrios, L. E., Parra Vázquez, M., & Rosset, P. (2017). De la supresión al manejo del fuego en la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas: perspectivas campesinas. *Región y Sociedad*, 29(70), 31–70. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10253202002>
- Huaman Cardenas, L. D. (2021). Efecto de la quema en las propiedades fisicoquímicas de un suelo agrícola en el distrito de Sincos, Jauja, 2018 [Trabajo de grado, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11421>
- IBM Corp. (2013). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. IBM Corp., Armonk, NY: IBM Corp.

- 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. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53441497001>
- MacCarty, J., Richter, J., Tyukavina, S., Weisse, M., & Harris, N. (2023). The Latest Data Confirms: Forest Fires Are Getting Worse. World Resources Institute. <https://acortar.link/QuDELb>
- Manrique-Toala, T. O., Ramos-Rodríguez, M. P., De La Cruz-Rosales, G., Tigua-Pinela, Y., & Pincay-Ortega, S. (2022). Uso del fuego en tierras de vocación forestal del cantón Jipijapa, Manabí, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 12(2), 40–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.54753/blc.v12i2.1600>
- Quissindo, I. A. B. (2018). Estimación del comportamiento del fuego en quema controlada en la Hacienda Experimental de Ngongoinga (Huambo, Angola). *Revista Digital de Medio Ambiente "Ojeando La Agenda,"* 54. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6639418>
- Ramos-Rodríguez, M. P., Cedeño-Cedeño, D. S., Batista, A. C., Jimenez-González, A., Manrique-Toala, T. O., & Terro, A. F. (2021a). Usos tradicionales del fuego en la Parroquia Ayacucho, cantón Santa Ana, provincia Manabí, Ecuador. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(43), 41–52. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i43.5807>
- Ramos-Rodríguez, M. P., García-Castro, H. J., Tetto, A. F., Batista, A. C., Manrique-Toala, T. O., & Estévez-Valdés, I. (2021b). Ocurrencia de incendios forestales en el cantón Santa Ana, provincia de Manabí, Ecuador (2012-2018). *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 9(3), 322–339. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2310-34692021000300322&script=sci_art-text
- Ramos-Rodríguez, M. P., Tigua-Parralles, 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), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3012509>
- Ramos Rodríguez, M. P., Corone Pícol, O. G., González, A. J., Cevallos Cantos, C. G., Zúñiga Tapia, M. V., & Jalca Mero, O. F. (2019). Fire behavior at an experimental scale in a plantation of *Tectona grandis* L.f. In Jipijapa, Manabí, Ecuador. *Revista Brasileirade Ciencias Agrarias*, 14(1), 1–9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5607>
- Ramos Rodríguez, M. P., Acosta Tufiño, J. M., Vivar González, J. C., Manrique Toala, T. O., & Jimenez González, A. (2024). Comportamiento del fuego en quemas controladas en tierras de vocación forestal en Sancán, Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 12(1), 2–21. <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v12n1/2310-3469-cfp-12-01-e831.pdf>
- Seeger, 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://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/view/31385>
- Seeger, C. D., Batista, A. C., Tetto, A. F., Giongo Alves, M. V., Soares, R. V., & Biondi, D. (2016). Incremento da biomassa aérea da vegetação dos campos naturais do Paraná em período pós-queima. *Floresta*, 46(1), 93–101. <https://doi.org/10.5380/rf.v46i1.43381>
- United Nations Environment Programme. (2022). Spreading like wildfire - The rising threat of extraordinary landscape fires. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi. <https://acortar.link/8rrTTD>
- Wanchuk, M. R., Mcgranahan, D. A., Sedivec, K. K., Swanson, K. C., & Hovick, T. J. (2024). Prescribed fire increases forage mineral content in grazed rangeland. *International Journal of Wildland Fire*, 33(7), 1–9. <https://doi.org/10.1071/WF24009>
- Westerling, A. L. (2016). Increasing western US forest wildfire activity: sensitivity to changes in the timing of spring. *Philosophical Transactions Royal Society*, 371, 1–10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0178>

Cómo citar: Ramos-Rodríguez, M. P., Azuero-Sarango, R. G. ., Baque-Suarez, J. J. ., & Mero-Santana, A. C. . (2025). Efectos de variables meteorológicas y del combustible sobre el comportamiento del fuego en quemas controladas para limpieza de terrenos . *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 9(2), 137–151. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v9.n2.2025.137-151>