



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

### Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

#### Carrera de Ingeniería Forestal

Inflamabilidad de combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador.

Trabajo de Titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Forestal

#### AUTOR:

Jackson Alejandro Troya Abad

#### DIRECTOR:

Ing. Luis Fernando Muñoz Chamba M. Sc.

Loja – Ecuador

2023

## Certificación

Loja, 09 de septiembre de 2022

Ing. Luis Fernando Muñoz Chamba MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Inflamabilidad de combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador.**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Forestal**, de la autoría del estudiante **Jackson Alejandro Troya Abad**, con **cédula de identidad Nro. 1150708228**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.



Ing. Luis Fernando Muñoz Chamba MSc

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## Autoría

Yo, **Jackson Alejandro Troya Abad**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula:** 1150708228

**Fecha:** 20 de mayo del 2023

**Correo electrónico:** [jackson.a.troya@unl.edu.ec](mailto:jackson.a.troya@unl.edu.ec)

**Celular:** 0979976499

## **Carta de autorización por parte del autor para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación**

Yo, **Jackson Alejandro Troya Abad**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Inflamabilidad de combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador.**, como requisito para optar el título de **Ingeniero Forestal**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización firmo, en la ciudad de Loja a los veinte días del mes de junio del dos mil veintitrés.

**Firma:**



**Autor:** Jackson Alejandro Troya Abad

**Cédula:** 1150708228

**Dirección:** Lourdes entre Bolívar y Sucre

**Correo electrónico:** [jackson.a.troya@unl.edu.ec](mailto:jackson.a.troya@unl.edu.ec)

**Celular:** 0979976499

### **DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director de Trabajo de Titulación:** Ing. Luis Fernando Muñoz Chamba, Mg. Sc

## **Dedicatoria**

El presente proyecto de investigación es dedicado a mis padres Felix Troya y Rosa Abad quienes han sido parte fundamental en mi formación académica y personal, quienes siempre han creído en mí, dándome el ejemplo superación y sacrificio, permitiéndome adquirir el deseo de superación; siendo ellos los principales protagonistas de este nuevo sueño logrado.

**-Jackson Alejandro Troya Abad-**

## **Agradecimiento**

Quiero agradecer primeramente a Dios por permitirme culminar una meta más de ser profesional, principalmente a mi familia quienes han sido pilar fundamental para lograr mi objetivo y haberme apoyado incondicionalmente en mi formación profesional.

Agradezco de manera muy especial a mi director de tesis Ing. Luis Muñoz Chamba, docente de la Universidad Nacional de Loja, de la carrera Ingeniería Forestal, por impartir sus conocimientos, tiempo y sobre todo su apoyo durante todo el proceso en que se realizó el presente proyecto de investigación y a todos mis compañeros y amigos que formaron parte en todo este trayecto.

**-Jackson Alejandro Troya Abad-**

## Índice de contenidos

<b>Portada</b> .....	i
<b>Certificación</b> .....	ii
<b>Autoría</b> .....	iii
<b>Carta de autorización</b> .....	iv
<b>Dedicatoria</b> .....	v
<b>Agradecimiento</b> .....	vi
<b>Índice de contenidos</b> .....	vii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas .....	x
Índice de anexos.....	xi
1. <b>Título</b> .....	1
2. <b>Resumen</b> .....	2
2.1.    Abstract.....	3
3. <b>Introducción</b> .....	4
4. <b>Marco teórico</b> .....	6
4.1.    Fuego .....	6
4.1.1.    Elementos del triángulo del fuego .....	6
4.1.2.    Elementos del comportamiento del fuego.....	6
4.2.    Incendios forestales.....	8
4.3.    Combustibles forestales .....	9
4.3.1.    Clasificaciones de combustibles forestales .....	9
4.3.2.    Clasificación de combustibles por su ubicación .....	9
4.3.3.    Disponibilidad de combustible .....	10
4.4.    Inflamabilidad.....	10
4.4.1.    Elementos o características de la inflamabilidad.....	10
4.4.2.    Métodos de estudio para determinar inflamabilidad de combustibles.....	11
4.5.    Investigaciones realizadas sobre inflamabilidad de combustibles forestales.....	11
5. <b>Metodología</b> .....	13
5.1.    Área de estudio .....	13
5.2.    Diseño de muestreo y tamaño de la muestra .....	14
5.3.    Metodología para evaluar el tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de llama.....	14
5.3.1.    Tiempo de ignición .....	16

5.3.2.	Sostenibilidad.....	16
5.3.3.	Combustibilidad.....	16
5.3.4.	Altura de la llama.....	17
5.4.	Metodología para determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos. .....	17
5.5.	Análisis de la información .....	19
6.	<b>Resultados</b> .....	20
6.1.	Evaluación del tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama para combustibles forestales muertos.....	20
6.2.	Inflamabilidad de combustibles forestales muertos .....	23
7.	<b>Discusión</b> .....	25
7.1.	Características de la Inflamabilidad .....	25
7.2.	Inflamabilidad de Combustibles forestales muertos.....	27
8.	<b>Conclusiones</b> .....	30
9.	<b>Recomendaciones</b> .....	31
10.	<b>Bibliografía</b> .....	32
11.	<b>Anexos</b> .....	38



## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Ubicación del bosque nativo del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro” y parcelas de donde se obtuvo las muestras de combustibles forestales muertos.....	13
<b>Figura 2.</b> Epirradiador utilizado para determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos.....	15
<b>Figura 3.</b> Distribución de valores del tiempo de ignición por tipo de combustible forestal muerto.....	21
<b>Figura 4.</b> Distribución de valores de sostenibilidad por tipo de combustible forestal muerto .....	22
<b>Figura 5.</b> Distribución de valores de combustibilidad por tipo de combustible forestal muerto.....	22
<b>Figura 6.</b> Distribución de valores de altura de las llama por tipo de combustible forestal muerto.....	23
<b>Figura 7.</b> Análisis de clúster por medio de un dendrograma para la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos presentes en el bosque del PUFVC.....	24

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Tipo de combustible forestal muerto utilizado para determinar su inflamabilidad .....	14
<b>Tabla 2.</b> Categorías de inflamabilidad propuestas por Hachmi et al. (2011).....	18
<b>Tabla 3.</b> Índices de inflamabilidad de acuerdo con el método de Valette (1990).....	18
<b>Tabla 4.</b> Estadísticas descriptivas de las características de la inflamabilidad de los combustibles forestales muertas presentes en el bosque andino del PUFVC...20	
<b>Tabla 5.</b> Índices y categorías de inflamabilidad por tipo de combustible forestal muerto presente en el bosque nativo del PUFVC por medio de los métodos de Valette (1990) y Hachmi et al. (2011) .....	24

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Valores de contenido de humedad para los cuatro tipos de combustibles forestales muertos .....	38
<b>Anexo 2.</b> Script del análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de humedad de los cuatro tipos de combustibles forestales muertos .....	39
<b>Anexo 3.</b> Script de la prueba no paramétrica Kruskal Wallis para el tiempo de ignición ..	42
<b>Anexo 4.</b> Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la sostenibilidad .....	44
<b>Anexo 5.</b> Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la combustibilidad .....	45
<b>Anexo 6.</b> Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la altura de las llamas.....	47
<b>Anexo 7.</b> Estadísticas descriptivas de los combustibles forestales muertos. TI: tiempo de ignición, TC: sostenibilidad, C: combustibilidad, FH: altura de la llama .....	49
<b>Anexo 8.</b> Certificado de traducción .....	52

## **1. Título**

Inflamabilidad de combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, Ecuador.

## 2. Resumen

Los bosques naturales son ecosistemas cada vez más propensos y vulnerables a la ocurrencia de incendios forestales, más aún cuando en estos existe una carga o cantidad importante de combustibles forestales vivos y muertos con diferentes características o capacidades para inflamarse. El objetivo fue contribuir al conocimiento del comportamiento del fuego mediante el estudio de la inflamabilidad de combustibles forestales muertos a través de la determinación de sus características y categoría de inflamabilidad bajo condiciones de laboratorio. El estudio se realizó en el bosque andino del Parque Universitario Francisco Vivar Castro. Se seleccionaron los combustibles forestales muertos finos, ligeros, medianos y la hojarasca. La unidad de muestra estuvo conformada por un peso de 10 gramos, con 50 repeticiones por combustible. Las características de la inflamabilidad evaluadas fueron: tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama. Las muestras se evaluaron por medio de un epirradiador a una temperatura fija de 350 °C para hojarasca y combustible fino, 375 °C para ligeros, y en combustibles medianos a 420 °C por medio del método de llama directa. La categoría de inflamabilidad fue determinada por medio de los métodos de Valette y Hachmi, permitiendo que los combustibles forestales muertos presenten categorías desde muy poco inflamable hasta extremadamente inflamable. La hojarasca presentó una categoría de extremadamente inflamable, el combustible fino se categorizó en poco inflamable y muy extremadamente inflamable, el combustible ligero dio como resultado muy poco inflamable y muy extremadamente inflamable, el combustible mediano presentó una categoría de muy poco inflamable. La hojarasca presentó el menor tiempo de ignición (15,84 s), menor sostenibilidad (46,48 s), mayor altura de la llama (64,06 cm) y mayor combustibilidad (0,21g/s) con respecto al resto de combustibles. Por otra parte, los combustibles medianos presentaron los siguientes promedios: mayor tiempo de ignición (170,46 s), mayor sostenibilidad (144,74 s), combustibilidad (0,07 g/s) y la altura de las llamas (15,32 cm) fueron las más bajas en relación con el resto de los combustibles. Las categorías de inflamabilidad son resultados prometedores pues constituye un importante avance en el conocimiento del comportamiento, ecología y manejo del fuego permitiendo iniciar el estudio a nivel de especies y ecosistemas.

**Palabras clave:** combustibilidad, fuego, ignición, inflamabilidad, sostenibilidad.

## 2.1. Abstract

Natural forests are ecosystems that are increasingly prone and vulnerable to the occurrence of forest fires, even more so when there is a significant load or quantity of live and dead forest fuels with different characteristics or capacities to ignite. The objective was to contribute to the knowledge of fire behavior by studying the flammability of dead forest fuels through the determination of their characteristics and flammability category under laboratory conditions. The study was carried out in the Andean forest of the Francisco Vivar Castro University Park. Fine, light and medium dead forest fuels and leaf litter were selected. The sample unit consisted of a weight of 10 grams, with 50 replicates per fuel. The flammability characteristics evaluated were: ignition time, sustainability, combustibility and flame height. The samples were evaluated by means of an epiradiator at a fixed temperature of 350 °C for litter and fine fuels, 375 °C for light fuels, and in medium fuels at 420 °C by means of the direct flame method. The flammability category was determined by means of the Valette and Hachmi methods, allowing us that the dead forest fuels presented categories from very slightly flammable to extremely flammable. The litterfall presented a category of extremely flammable, the fine fuel was categorized as low flammable and very extremely flammable, the light fuel resulted in very low flammable and very extremely flammable, the medium fuel presented a category of very low flammable. The litter had the shortest ignition time (15.84 s), lowest sustainability (46.48 s), highest flame height (64.06 cm) and highest combustibility (0.21g/s) with respect to the other fuels. On the other hand, the medium fuels presented the following averages: longer ignition time (170.46 s), higher sustainability (144.74 s), combustibility (0.07 g/s) and flame height (15.32 cm) were the lowest with respect to the rest of the fuels. The flammability categories are promising results because they constitute an important advance in the knowledge of fire behavior, ecology and management, allowing to initiate the study at the species and ecosystem level.

**Keywords:** combustibility, fire, ignition, flammability, sustainability.

### 3. Introducción

Los ecosistemas naturales son imprescindibles para la vida en el mundo, proveen de una serie de bienes y servicios como regulación de la temperatura y la humedad, con lo cual se equilibra el clima; otorgan alimento, medicina y refugio a los organismos vivos; y son fuente de materia prima para la sociedad (CONAFOR, 2010). Dichos bienes y servicios ecosistémicos se ven en peligro por distintas causas como la conversión de uso del suelo, degradación de suelos, sobreexplotación de recursos, incendios forestales, demanda de alimentos, agua dulce y efectos por el uso de combustibles fósiles (Montes y Sala, 2007).

El fuego tiene un efecto positivo en la naturaleza, puesto que ayuda a conservar la diversidad biológica (CONAFOR, 2010) pero una vez que se usa de manera imprudente o se crea por alguna negligencia, puede transformarse en un incendio forestal con graves secuelas devastadoras para el ambiente, flora, fauna y seres humanos (Arellano y Castillo, 2014; CONAFOR, 2010).

Un incendio forestal es el fuego que se desarrolla sin control en un terreno forestal afectando a combustibles vegetales (Agama, 2016). Además, su intensidad está altamente relacionada con el tipo de vegetación, tipos de combustibles presentes, contenido de humedad, condiciones topográficas, condiciones climáticas y la inflamabilidad del combustible forestal (Hachmi et al., 2011).

La inflamabilidad de un combustible se entiende como su capacidad para entrar en ignición y sostener el fuego (Santacruz, 2018, Hachmi et al., 2011), por lo tanto, es un elemento o propiedad de los combustibles que influye en el comportamiento del fuego, más aún cuando existen diferentes tipos de combustibles en los bosques tropicales. Por la continua fragmentación que afecta a tales ecosistemas y porque cada año existe evidencia de más incendios que cualquier otra parte del mundo (Cochrane, 2009), los convierte cada vez más susceptibles a incendios forestales, siendo necesario iniciar estudios sobre inflamabilidad de combustibles forestales, muertos y vivos, para entender más el comportamiento del fuego y los impactos ambientales que estos pueden generar (Neri et al., 2009).

En Ecuador los incendios forestales se dan más en la región Sierra con el 80 % de eventos registrados, un 18 % en la Costa y menos del 2% en la Amazonia y región Insular (CAF, 2020).

Se reporta en el 2020 la pérdida de 23 462,94 hectáreas de cobertura vegetal, en 1 962 eventos registrados (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos [SNGR], 2020). Las provincias de mayor afectación por incendios forestales son: Loja, Pichincha, Imbabura, Chimborazo, Azuay, El Oro, Guayas, Manabí, y Santa Elena, los cuales, en un 99 % son por acción humana, negligencia, quemas agrícolas no controladas, fogatas o acciones pirómanas (CAF, 2020).

El Parque Universitario Francisco Vivar Castro (PUFVC), ubicado en la ciudad de Loja, sur de Ecuador, registra para el año 2010 un área afectada por incendios, aproximadamente 7 ha, perjudicando los ecosistemas de páramo antrópico y matorral alto. Los incendios son provocados en los alrededores del PUFVC, por quemas no controladas, permitiendo afectar las coberturas vegetales existentes en el parque, teniendo como resultado la pérdida de biodiversidad, degradación de suelos y aparición de especies invasoras (Aguirre y Yaguana, 2014). La presente investigación trata de dar respuesta al desconocimiento de la inflamabilidad de los combustibles forestales, principalmente muertos, que se encuentran presentes en el Bosque Andino del PUFVC.

Los objetivos planteados en la presente investigación fueron:

### **Objetivo general**

Contribuir al conocimiento del comportamiento del fuego mediante el estudio de la inflamabilidad de combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama para combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino.
- Determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino.



## 4. Marco teórico

### 4.1. Fuego

El fuego de una manera sencilla se define como la combustión manifestada en luz y calor de un elemento carburante (Ramos, 2010). Se trata de un fenómeno físico que consiste en reacciones químicas que liberan energía en forma de luz y calor (Nava y Jardel, 2020) y requiere de una fuente de combustibles, presencia de oxígeno y calor (Arellano y Castillo, 2014).

#### 4.1.1. Elementos del triángulo del fuego

El triángulo del fuego se conoce a aquel proceso en donde entran en combinación tres elementos que producen calor, luz, y generalmente llamas (Ramos, 2010). Estos elementos, representados en un triángulo son: combustible, oxígeno y calor.

- **Combustible:** material de cuerpo sólido, líquido o gaseoso que es susceptible a encender (Albornoz et al., 2016).
- **Oxígeno:** es un componente importante de la atmósfera, al 21% y a medida que disminuye el porcentaje de oxígeno, la combustión se ralentiza hasta que se agota (Albornoz et al., 2016).
- **Fuente de calor:** el calor es un tipo de energía, su contribución para hacer fuego es tan importante que se dice que todo fuego comienza con calor. La fuente de calor e ignición a menudo se subestiman en las operaciones de prevención de incendios, pero aún desempeñan uno de los roles más importantes si se cree que las empresas a menudo tienen materias primas por razones de fabricación. Para iniciar la combustión se requiere combustible para generar vapor, y esto se logra a través del calor (Botta, 2013).

#### 4.1.2. Elementos del comportamiento del fuego

La propagación del fuego es determinada por el tipo de material combustible presente, las condiciones meteorológicas y la topografía (Ramos, 2010; Santos et al., 2014). Estos elementos forman lo que se conoce como triángulo del comportamiento del fuego, los que durante un incendio influyen en las magnitudes de los parámetros del comportamiento y características de los incendios forestales. Estos elementos se describen a continuación.

- **Combustible:** Los combustibles constituyen uno de los factores de la gran tríada del fuego ya que este al arder suministra la energía calórica al incendio. El combustible es el principal factor que determina si se inicia o no un incendio, la dificultad de controlarlo y la probabilidad de comportamiento irregular. También es el único factor del triángulo sobre el cual cabe actuar directamente. Ni el tiempo atmosférico ni la topografía pueden modificarse (Bonilla, 2001).
- **Tiempo atmosférico:** son condiciones climáticas o condiciones atmósfera definidas por los elementos meteorológicos en un momento dado. Debido a que es de gran ayuda la previsión meteorológica tanto en la fase preventiva como en los controles, permitiéndonos determinar el nivel de peligro de un incendio, ya que nos permite anticipar el comportamiento del incendio (USAID, 2006).
- **Topografía:** es el conjunto de rasgos que presenta un terreno en su distribución superficial. El impacto del terreno en la velocidad de expansión es tan anormal que siempre se lo considera un factor importante para lograr determinar el comportamiento del fuego y se la equipara a la ejercida por el viento. Por ser el factor más constante es el más fácil de predecir en el triángulo del fuego (USAID, 2006).

Para que el incendio pueda propagarse, el fuego debe transferirse desde la zona de combustión hacia donde están ubicados los combustibles, que puede ser de tres maneras: radiación, conducción y convección.

- **Radiación:** por ondas que viajan por el espacio en todas direcciones de igual intensidad.
- **Conducción:** a través de un medio sólido por conexión. La vegetación y el suelo es un mal conductor del calor, por lo que casi no tiene ningún efecto, en la lucha contra los incendios forestales.
- **Convección:** debido al movimiento del aire hacia arriba y empujado por el viento. Este es la que más determina los incendios forestales.

## 4.2. Incendios forestales

Los incendios forestales se dan de manera natural o antrópico, ocurren en los ecosistemas terrestres y se propagan por la vegetación, sean bosques o de cualquier otro tipo. Los incendios forestales se extienden y se propagan sobre la vegetación sin ningún control humano, los incendios son provocados principalmente por el ser humano y en algunos casos de manera natural. Con el pasar de los años el fuego ha contribuido a organizar la naturaleza, las características de las plantas, la organización de las comunidades, la distribución de los biomas y la diversidad florística. La aparición del ser humano ha ocasionado cambios bruscos en los regímenes de incendios en muchos ecosistemas, tanto incrementando la frecuencia de los incendios provocados, lo cual disminuye la fragmentación de los paisajes naturales. Esto trae consecuencias negativas para la biodiversidad (Pausas, 2012). Teniendo en cuenta Ávila (2022), para que se realice un incendio forestal, existen tres factores básicos e importantes para que suceda: el material combustible, las condiciones ambientales favorables y un factor de inicio. De acuerdo con Ramos (2010), el comportamiento de los incendios forestales depende principalmente de los combustibles. Piñeiro (2022) argumenta que el combustible forestal puede manipularse, especialmente eliminándolo o reduciéndolo, para evitar así gran cantidad de combustible, que permita minimizar en gran medida el riesgo de incendios. Sin embargo, la CONAFOR (2010), menciona que existe varios tipos de incendio forestal. Cuando la llama se extiende de manera horizontalmente por el suelo y alcanza una altura de metro y medio, se denominan incendios superficiales. Afectando en si a los combustibles vivos y muertos, por ejemplo, como hierbas, hojas, ramas, arbustos o árboles jóvenes, regeneración natural, entre otros. Cuando un fuego superficial se propaga bajo el suelo, se convierte en un incendio subterráneo. En este caso, la materia orgánica acumulada y las raíces se queman e incluso pueden alcanzar afloramientos rocosos. No suelen provocar llamas y emiten poco humo. Pero los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar son los incendios aéreos, que consumen toda la vegetación. También parten de la superficie, pero en este caso las llamas primero se extienden por el suelo y se extienden en continuidad vertical, es decir, trepan por la vegetación establecida, que actúa como una escalera en las copas de los árboles.

### 4.3. Combustibles forestales

Se define el combustible forestal como el material vegetal leñoso, ligeros, vivos o muertos, es decir todo el componente vegetal presente en un ecosistema que tiene la capacidad de encenderse y arder al ser expuesto a una fuente de calor (Díaz et al., 2013). Para Ramos (2010), los combustibles son esenciales para la ocurrencia y propagación del fuego, y dentro del bosque todo el material presente es un combustible con diferentes características.

Cuando se genera una fuente de calor, la presencia de cantidad suficiente de combustible permitirá el desprendimiento de calor y llama, dando paso a la continuidad del proceso de combustión iniciado, en forma de cadena (Ramos, 2010; Vélez, 2000).

#### 4.3.1. Clasificaciones de combustibles forestales

Los combustibles forestales muertos se clasifican por su tamaño y forma (Díaz, 2015), de la siguiente manera:

- **Finos y ligeros:** son de diámetro menor de 0,6 cm corresponden a ramillas muy finas.
- **Regulares:** son de diámetro de 0,6 a 2,5 cm, los cuales abarcan a ramas y tallos pequeños.
- **Medianos:** son de diámetro de 2,6 a 7,5 cm, se los encuentran en fustes y ramas gruesas. Este tipo de combustible se calienta muy despacio.
- **Pesados:** son fustes con diámetros mayores a 7,5 cm.
- **Hojarasca:** es la acumulación de material vegetal de hojas, tallos e inflorescencias que se encuentra sobre la superficie del suelo. (Crespo, 2013; Crespo, 2015).

#### 4.3.2. Clasificación de combustibles por su ubicación

Según Nájera (2015) menciona la siguiente clasificación:

- **Aéreo:** ramas que se encuentran en los fustes de los árboles, follaje y musgos, se encuentran a más de 1,5 m de altura.
- **Superficiales:** estas se encuentran compuestas por hojas, ramas, ramillas, arboles jóvenes o arbustos, fustes, que están dentro de 1,5 m a partir del suelo.

- **Subterráneos:** se enfoca en las raíces, materia orgánica en descomposición y otros materiales que estén en el suelo mineral.

#### 4.3.3. Disponibilidad de combustible

Según Nájera (2015) menciona la siguiente clasificación:

- **Combustible total:** se basa en todo material vegetal en el área. Se incluyen el combustible vivo y muerto.
- **Combustible disponible:** se consideran a todo combustible que está en condiciones de arder y consumirse durante el incendio.
- **Combustible restante:** son aquellos combustibles que no está disponible para arder y son los que quedan después del incendio.

#### 4.4. Inflamabilidad

La inflamabilidad es la propiedad que posee un vegetal para inflamarse desde que una fuente de calor entra en contacto con él (Hachmi et al., 2011; Neri et al., 2009; Hernando y Elvira, 1989). Se trata de un concepto complejo, que muchas veces tiende a confundirse entre investigadores conduciendo a la existencia de numerosas definiciones, que en general, se relacionan entre sí, como ignición y combustibilidad.

##### 4.4.1. Elementos o características de la inflamabilidad

De acuerdo con Neri et al. (2009), la inflamabilidad está dada por tres elementos que son: tiempo de ignición (ignitabilidad), duración de la combustión (sostenibilidad) y calor liberado (combustibilidad), los cuáles se describen a continuación:

- **Combustibilidad o velocidad a la que se quema un combustible:** es la forma en que se queman los vegetales, una vez que se han inflamado (White y Zipperer, 2010; Neri et al., 2009).
- **Sostenibilidad o duración de la llama:** describe la propiedad de un combustible para continuar quemándose (Neri et al., 2009).
- **Ignitabilidad o tiempo de ignición:** facilidad con la que un material entra en ignición (Neri et al., 2009; White y Zipperer, 2010).

#### 4.4.2. Métodos de estudio para determinar inflamabilidad de combustibles

Hernando y Elvira (1989) describen cinco métodos para determinar la inflamabilidad de los combustibles, que son:

- **Índice de oxígeno:** este método genera una variación en el índice de oxígeno, y debidamente fue un método desechado debido a que es imprecisa la observación de la inflamabilidad.
- **Epirradiador:** aparato eléctrico constituido de una corriente alterna de 110 voltajes, botón de emergencia, controlador de temperatura digital, una termocupla tipo k o J que permite medir la temperatura del material, un Rele de 110 v que permite el paso de la energía al elemento calefactor. Los ensayos se efectúan con muestras de 5 gramos de material fino y verde.
- **Epirradiador modificado:** ubicado en el radiador en posición horizontal, se sostiene sobre la muestra de 5gr, de material vegetal fina y gruesa. Este método tiene una dificultad de mantener todo el material a la misma distancia que el epirradiator, debidamente la precisión que resulta no es suficiente y si se logra incrementar el número de ensayos positivos resulta ser un poco lento.
- **Epirradiador:** es similar al método 2 y 3, pero reduciendo el peso de la muestra.
- **Horno ISO:** se observa una ignición sin llama piloto, a diferencia de los demás métodos presenta una desviación aceptable.

#### 4.5. Investigaciones realizadas sobre inflamabilidad de combustibles forestales

Las investigaciones sobre la inflamabilidad de combustibles forestales vivos y muertos son muy limitados o escasos, existiendo mayores experiencias hacia los combustibles vivos. En el Ecuador, la mayoría de los estudios se centra en conocer el efecto o impacto del fuego sobre la vegetación (Sarango et al., 2019; Anchaluisa y Suárez, 2013), comportamiento del fuego (Giler, 2020). Para el sur del Ecuador, se reporta las primeras investigaciones sobre el cálculo de la inflamabilidad de combustibles forestales vivos y muertos, por ejemplo, Labanda (2021) utiliza el método del epirradiator para determinar la inflamabilidad de combustibles forestales muertos del bosque siempreverde montano de la cordillera oriental del sur de Ecuador, Vele (2023) determina

la inflamabilidad de especies forestales representativas del bosque andino por medio del método de llama directa.

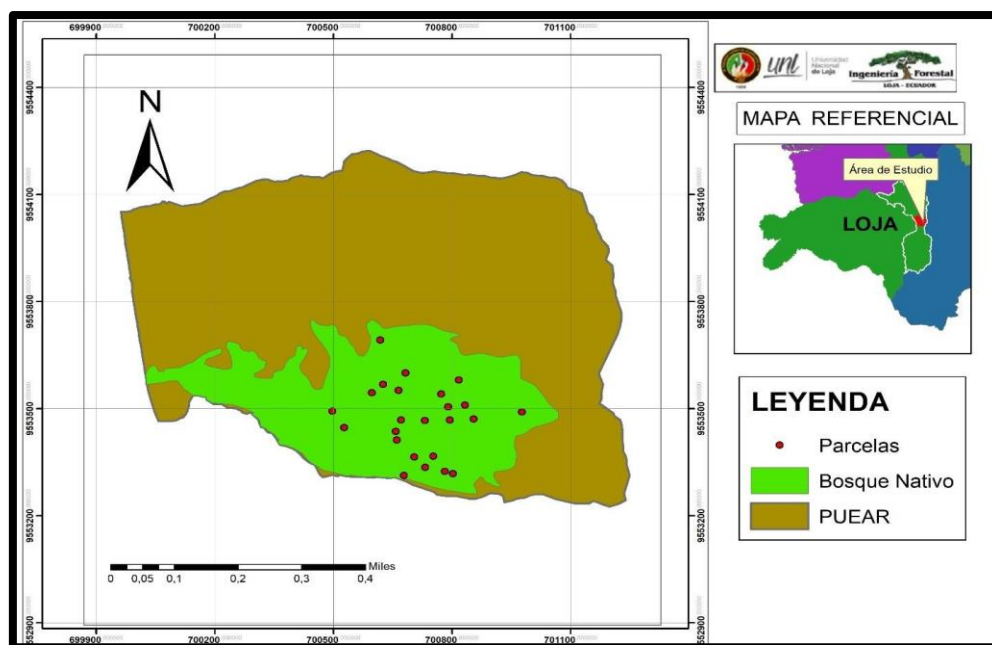
Por otra parte, a una escala global y regional se han realizado diferentes investigaciones sobre la inflamabilidad, tal es el caso de Carrasco et al. (2016) quienes realizaron un estudio sobre inflamabilidad de especies vegetales del ecosistema de pinares, y manifiestan que la inflamabilidad de la vegetación es muy variable, depende no solo del contenido de humedad, sino también de las características químicas y de la estructura de las plantas. Neri et al. (2009) investigaron la inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche, y sostienen que en este tipo de ecosistema los combustibles forestales superficiales entran en combustión con mayor facilidad a diferencia de los combustibles subterráneos, los que necesitan de sequías más intensas para lograr secarse lo suficiente y así poder encender o prenderse. Behm et al. (2004) determinaron la inflamabilidad de especies nativas del sotobosque en bosques de pinares y concluyeron que las diferencias de inflamabilidad entre especies existen pero que las causas de tales diferencias también son diferentes. Dimitrakopoulos et al. (2001) realizaron la evaluación de inflamabilidad de combustibles en bosques mediterráneos bajo condiciones de laboratorio, evaluaron el tiempo de ignición de varios combustibles dominantes en los bosques mediterráneos para determinar clasificaciones relativas de inflamabilidad y el contenido de humedad de extinción para dichos combustibles. De Magalhães et al. (2012), investigaron los efectos de mezclas no aditivas en un bosque templado considerando características de las hojas sobre la inflamabilidad de la hojarasca, demostraron efectos positivos no aditivos en las mezclas de hojarasca, es decir las hojas de las especies más inflamables podrían tener efectos desproporcionados en el desarrollo de incendios forestales.

## 5. Metodología

### 5.1. Área de estudio

La investigación se realizó en el Parque Universitario “Francisco Vivar Castro” (PUFVC), situado en la parroquia San Sebastián, cantón Loja, propiedad de la Universidad Nacional de Loja, a 5 km de la ciudad, con una superficie total de 99 ha, en un rango altitudinal de 2 130 a 2 520 m.s.n.m (Figura 1). Posee una diversidad de ecosistemas, diferenciables por su composición, estructura y función entre ellos: bosque nativo, matorral alto y bajo, páramo antrópico, pastizales, plantaciones forestales (Aguirre y Yaguana, 2014). El escenario de estudio fue el bosque nativo, de donde se obtuvo material combustible forestal muerto para el análisis de inflamabilidad en condiciones de laboratorio.

El PUFVC presenta una temperatura media anual de 16,6 °C, precipitación total anual de 955 mm, humedad relativa de 71,6 %, y el suelo está constituido por material parental de rocas metamórficas, baja fertilidad, medianamente profundos, textura franco arenoso y franco arcilloso, pH ácido, valores bajos de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio. La topografía del terreno es accidentada, con pendientes que fluctúan entre 40-90 % (Aguirre y Yaguana, 2014).



**Figura 1.** Ubicación del bosque nativo del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro” y parcelas de donde se obtuvo las muestras de combustibles forestales muertos.



## 5.2. Diseño de muestreo y tamaño de la muestra

Mediante un diseño aleatorio, se seleccionó muestras de diferentes tipos de combustibles forestales muertos ubicados en parcelas temporales de 20 x 20 m, distribuidas en el bosque andino. La muestra por combustible forestal estuvo conformada por un peso de 10 gramos, con 50 repeticiones por tipo de combustible.

Los tipos de combustibles forestales muertos evaluados y presentes en el bosque nativo del PUFVC se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tipo de combustible forestal muerto utilizado para determinar su inflamabilidad.

<b>Tamaño y Peso</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Tiempo de retardo (h)</b>
<b>Finos/livianos</b>	<0,6	1
<b>Pequeños/ligeros</b>	0,6 - 2,5	10
<b>Regulares/Medianos</b>	2,51 - 7,5	100
<b>Hojarasca</b>	Restos de hojas, frutos, etc.	

**Fuente:** Brown et al. (1982), Díaz et al. (2012)

## 5.3. Metodología para evaluar el tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de llama

Previo a determinar las características de la inflamabilidad, se calculó la humedad de los combustibles forestales muertos, la misma que es considerada como un factor significativo y variable que determina el proceso de combustión e inflamabilidad, y por ende el comportamiento del fuego. Para su cálculo se utilizó la fórmula descrita por Hernando y Elvira, (1989) y Rochas, (1994), que considera los pesos en húmedo y seco de los combustibles.

$$CH \% = \frac{Ph - Ps}{Ph} * 100$$

Donde:

**CH %** = Contenido de humedad

**Ph** = Peso húmedo (g)

**Ps** = Peso seco (anhidrido), después de ser secada en una estufa a 70°C (g)

Las características de la inflamabilidad como tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama se evaluaron bajo condiciones de laboratorio utilizando un epirradiador (Labanda, 2021; Hernando y Elvira, 1989), que incluye las siguientes características:

- Corriente alterna de 110 voltaje (VAC).
- Botón de emergencia (S1).
- Controlador de temperatura digital (P1), marca REX modelo CD701FK02.
- La termocupla tipo k, permite medir la temperatura del material y del área donde se logrará evaluar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos, a través de un sistema de conversión análogo-digital, es decir, el termopar interpreta los datos y controla (K1) del contactor.
- El Rele de 110 v (K1), permite el paso de la energía al elemento calefactor (R1)
- R1, se encarga de emitir la radiación dependiendo de los datos censados por la termocupla y la interpretación del controlador (Figura 2)



**Figura 2.** Epirradiador utilizado para determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos

Las características o propiedades de la inflamabilidad se evaluaron acorde a la metodología desarrollada por Labanda et al. (2021); Hernando y Elvira (1989), y ajustada al presente estudio.

Cada muestra del combustible forestal muerto fue colocada en una malla de 15 x 15 cm, a 3 cm de la resistencia eléctrica que estuvo a una temperatura de 350 °C. Esta temperatura fue considerada para la hojarasca y combustible fino; en el caso del combustible ligero la temperatura fue

de 375 °C y para combustible mediano fue de 420 °C por medio del método de llama directa (Martin et al., 1994). Estos ajustes en temperatura y método obedecen a que los combustibles ligeros y medianos presentaron ignición frente a temperaturas mayores a 350 °C.

La temperatura de cada prueba de ignición fue medida a través de la termocupla tipo K en el epirradiador y para el método de la llama directa se utilizó un termómetro pistola láser.

### **5.3.1. Tiempo de ignición**

El tiempo de ignición (TI), medido en segundos, consistió en el tiempo transcurrido desde que se expuso la muestra a la fuente de calor hasta que esta entró en ignición o aparición de la llama (Hachmi et al., 2011; Gill y Moore, 1996). Para su medición se utilizó un cronómetro.

### **5.3.2. Sostenibilidad**

Para estimar la sostenibilidad (TC), se calculó la diferencia entre el tiempo de extinción de la llama y el tiempo de ignición o aparición de la llama (Gill y Moore, 1996), con la ayuda de un cronómetro. La fórmula utilizada para su cálculo fue:

$$TC = t_f - t_i$$

Donde:

**TC** = sostenibilidad de los combustibles forestales (s)

**T<sub>f</sub>** = momento de la extinción de las llamas (s)

**T<sub>i</sub>** = momento en que se observa por primera vez la ignición. Iniciación de las llamas (s)

### **5.3.3. Combustibilidad**

La combustibilidad (C), expresada en gramos por segundo, se considera como la velocidad en la que se quema el combustible, se calculó aplicando la fórmula descrita por Gill y Moore (1996), que requiere el peso seco de la muestra antes de la ignición (g), peso final de la muestra después de la extinción de la llama (g), tiempo de extinción de la llama (s) y tiempo de ignición de la llama (s).

$$C_i = \frac{(W_f - W_i)}{(t_f - t_i)}$$

Donde:

**C** = combustibilidad (g/s)

**W<sub>f</sub>** = peso de la muestra antes de la ignición (g)

**W<sub>i</sub>** = peso final de la muestra después de la extinción de la llama (g)

**T<sub>f</sub>** = tiempo final de la llama al momento de su extinción (s)

**T<sub>i</sub>** = tiempo de ignición o aparición de la llama (s)

#### 5.3.4. Altura de la llama

La altura de la llama (FH), en centímetros, se determinó mediante una regla graduada y consistió en la altura que alcanzó la llama medida desde la base donde reposan los combustibles hasta el punto máximo (Ning et al., 2022; Hachmi et al., 2011).

#### 5.4. Metodología para determinar la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos.

La inflamabilidad de los combustibles forestales muertos fue determinada por medio de los métodos de Hachmi et al. (2011) y Valette (1990), que permitieron asignar una categoría de inflamabilidad por tipo de combustible.

La inflamabilidad por medio de Hachmi et al. (2011) propone el cálculo de un índice de inflamabilidad y su posterior clasificación en categorías. El índice considera las características de inflamabilidad como: tiempo de ignición, sostenibilidad y altura de la llama.

La fórmula utilizada para su cálculo fue:

$$FI = \left[ \frac{TC + 30 - \frac{TI}{2}}{TI + 10} \right] EXP \left[ \frac{FH}{FH + 40} \right]^2$$

Donde:

**FI**= índice de inflamabilidad

**TC** = sostenibilidad (s)

**TI** = tiempo de ignición (s)

**FH** = altura de la llama (cm)

Las categorías de inflamabilidad propuestas por Hachmi et al. (2011) se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Categorías de inflamabilidad propuestas por Hachmi et al. (2011)

<b>Categorías de inflamabilidad</b>	<b>Valor del índice de Inflamabilidad</b>
<b>Muy poco inflamable</b>	$FI < 0.5$
<b>Poco inflamable</b>	$0.5 \leq FI < 1.5$
<b>Moderadamente inflamable</b>	$1.5 \leq FI < 2.5$
<b>Inflamable</b>	$2.5 \leq FI < 3.5$
<b>Extremadamente inflamable</b>	$3.5 \leq FI < 4.5$
<b>Muy extremadamente inflamable</b>	$4.5 \leq FI$

El método de Valette (1990), propone índices y categorías de inflamabilidad de acuerdo con los valores promedio del tiempo de ignición (Ti) y número de ensayos positivos (Ni). Los Ni, en porcentaje, fueron las pruebas con tiempos de ignición y presencia de llama que sucedieron antes del minuto (Carrasco et al., 2016; Hernando y Elvira, 1989). En la Tabla 3, se presentan los índices de inflamabilidad de acuerdo con el tiempo de ignición y porcentaje de ensayos positivos.

**Tabla 3.** Índices de inflamabilidad de acuerdo con el método de Valette (1990).

<b>Tiempo de ignición promedio:</b>	<b>% Número de ensayos positivos (Ni)</b>					
	<b>Ti (s)</b>	<b>&lt; 50</b>	<b>50-79</b>	<b>80-84</b>	<b>85-89</b>	<b>90-94</b>
>32.5	0	0	0	1	1	2
27.5 – 32.5	0	0	1	1	2	2
22.5 – 27.5	0	0	1	2	2	2
17.5 – 22.5	1	1	2	2	3	3
12.5 – 17.5	1	1	2	3	3	4
<12.5	1	2	3	3	4	5

La categoría de inflamabilidad en función del tiempo de ignición (Ti) y número de ensayos positivos (Ni) propuestas por Valette (1990) fueron:

- 0** = muy poco inflamable
- 1** = poco inflamable
- 2** = moderadamente inflamable
- 3** = inflamable
- 4** = extremadamente inflamable
- 5** = muy extremadamente inflamable

## **5.5. Análisis de la información**

La información se analizó a través de estadísticas descriptivas por tipo de combustible forestal muerto, su representación se hizo por medio de tablas y gráficos. La información fue almacenada en hojas de cálculo en Excel y analizada en el software estadístico Rstudio versión 4.2.1. Para conocer si los valores de las características de inflamabilidad fueron diferentes entre tipos de combustibles forestales muertos se aplicó una comparación entre medias por medio de la prueba no paramétrica Kruskal Wallis considerando un nivel de significancia de 0,05, porque los datos no presentaron normalidad y homocedasticidad de varianzas.

## 6. Resultados

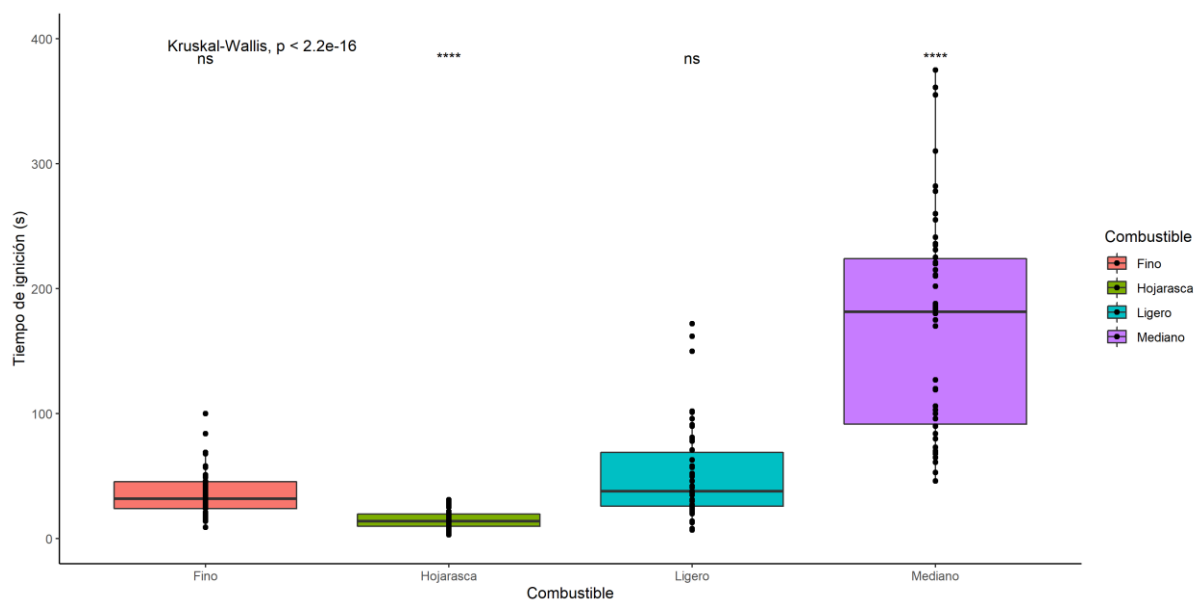
### 6.1. Evaluación del tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama para combustibles forestales muertos

En la Tabla 4 se presenta las estadísticas descriptivas para las características de inflamabilidad de los combustibles forestales muertos, evaluadas bajo condiciones de laboratorio. El contenido de humedad de los combustibles fue: 55,7 % para hojarasca, 53,7 % finos, 55,9 % ligeros y 59,9 % para los combustibles medianos (Anexo 1); los cuales no mostraron diferencia significativa entre grupos (ANOVA,  $p=0,581$ ;  $\alpha=0,05$ ), por lo que estos tuvieron igualdad en las condiciones de humedad durante las pruebas de laboratorio (Anexo 2).

**Tabla 4.** Estadísticas descriptivas de las características de la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino del PUFVC.

Combustible	Estadístico	Tiempo de ignición (s)	Sostenibilidad (s)	Combustibilidad (g/s)	Altura de la llama (cm)
Hojarasca	Media	15,84	46,48	0,21	64,06
	Error típico ( $\pm$ )	1,03	2,27	0,01	1,34
	Desviación estándar	7,31	16,08	0,07	9,49
	Coefficiente de variación (%)	46,17	34,60	33,21	14,81
Fino / Liviano	Media	35,86	96,16	0,10	45,44
	Error típico	2,59	3,68	0,00	0,70
	Desviación estándar	18,29	26,01	0,03	4,97
	Coefficiente de variación (%)	51,01	27,05	27,13	10,95
Pequeño / Ligero	Media	51,16	117,52	0,09	39,46
	Error típico	5,34	4,55	0,00	1,00
	Desviación estándar	37,73	32,14	0,03	7,06
	Coefficiente de variación (%)	73,74	27,35	31,31	17,90
Regular / Mediano	Media	170,46	144,74	0,07	15,32
	Error típico	12,39	12,94	0,01	0,77
	Desviación estándar	87,62	91,48	0,06	5,42
	Coefficiente de variación (%)	51,40	63,20	85,56	35,35

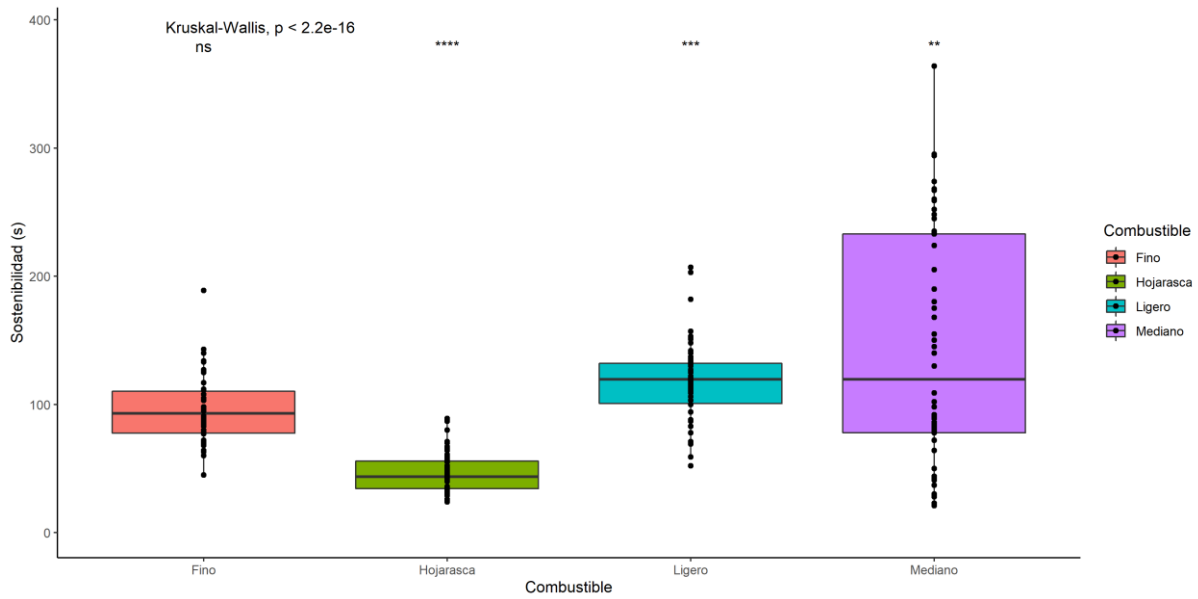
En la Figura 3, se representa el tiempo de ignición promedio para todos los combustibles forestales muertos fue de 68,33 s. Los combustibles finos, ligeros y la hojarasca presentaron tiempos de ignición menores al minuto, en especial la hojarasca que tuvo la aparición de la llama a los  $15,84 \text{ s} \pm 1,03 \text{ s}$ ; mientras que, los combustibles medianos tardaron en promedio aproximadamente tres minutos ( $170,46 \text{ s} \pm 12,39 \text{ s}$ ) en generar llama; donde se aprecia una variabilidad en los tiempos de ignición entre los tipos de combustibles, en especial para los medianos. De acuerdo con la prueba de Kruskal Wallis, los combustibles mostraron diferencias significativas entre estos ( $p\text{-valor} = 0,000$ ;  $\alpha = 0,05$ ). La hojarasca y los combustibles medianos fueron diferentes entre estos y con el resto de los combustibles; mientras que, entre los finos y ligeros no existieron diferencias significativas (Anexo 3)



**Figura 3.** Distribución de valores del tiempo de ignición por tipo de combustible forestal muerto.

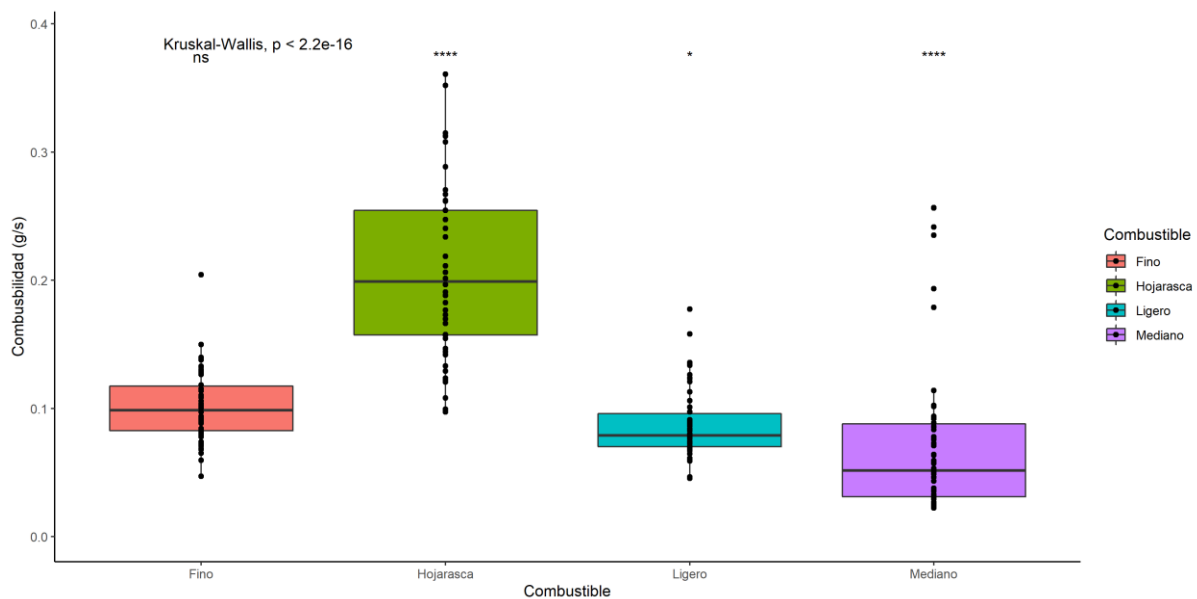
. En la Figura 4 se muestra la distribución de los valores de la sostenibilidad, donde se aprecia la variabilidad entre estos, en especial para combustibles medianos. La sostenibilidad o duración de la llama promedio para todos los combustibles forestales muertos fue de  $101,22 \text{ s}$ . Los combustibles finos, ligeros y la hojarasca presentaron los menores tiempos de sostenibilidad, principalmente la hojarasca con un valor de  $46,48 \text{ s} \pm 2,27 \text{ s}$ ; mientras que, en los combustibles medianos la sostenibilidad fue mayor ( $144,74 \pm 12,94 \text{ s}$ ). La prueba Kruskal Wallis encontró diferencias significativas ( $p\text{-valor} = 0,000$ ;  $\alpha = 0,05$ ) entre los combustibles, siendo la hojarasca, ligeros y medianos los que mostraron diferencia, a excepción de los combustibles finos (Anexo 4).





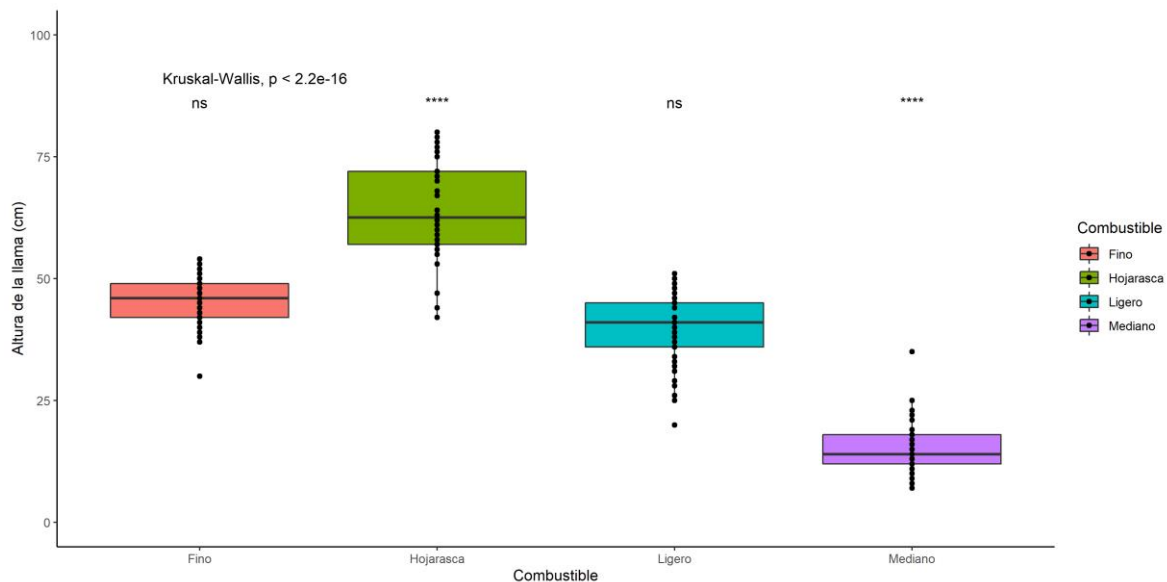
**Figura 4.** Distribución de valores de sostenibilidad por tipo de combustible forestal muerto.

En la Figura 5 se presenta la distribución de los valores de la combustibilidad donde se observa que existió una variabilidad mayor en la hojarasca. La combustibilidad promedio para todos los combustibles forestales muertos fue de 0,1172 g/s. Los combustibles finos, ligeros y medianos presentaron menor combustibilidad, mientras que en la hojarasca fue mayor (0,21 g/s  $\pm$  0,01 g/s). La prueba Kruskal Wallis evidenció diferencias estadísticas significativas (p-valor= 0,000;  $\alpha$ = 0,05) entre los combustibles, siendo la hojarasca y los combustibles ligeros y medianos los que mostraron diferencias entre sí (Anexo 5).



**Figura 5.** Distribución de valores de combustibilidad por tipo de combustible forestal muerto.

La altura de la llama promedio para todos los combustibles forestales muertos fue de 41,07 cm. Los combustibles finos y ligeros presentaron alturas de 39 cm y 45 cm respectivamente, la hojarasca un promedio de 64 cm y los combustibles medianos un promedio en altura de la llama de 15 cm. En la Figura 6 se presenta la distribución de los valores de la altura de llama, con una alta variabilidad entre los tipos de combustibles. La prueba Kruskal Wallis mostró la existencia de diferencias significativas ( $p$ -valor= 0,000;  $\alpha$ = 0,05) entre los combustibles, siendo la hojarasca y medianos diferentes entre sí y con el resto de los combustibles. Entre los combustibles finos y ligeros no hubo diferencias significativas (Anexo 6).



**Figura 6.** Distribución de valores de altura de las llama por tipo de combustible forestal muerto.

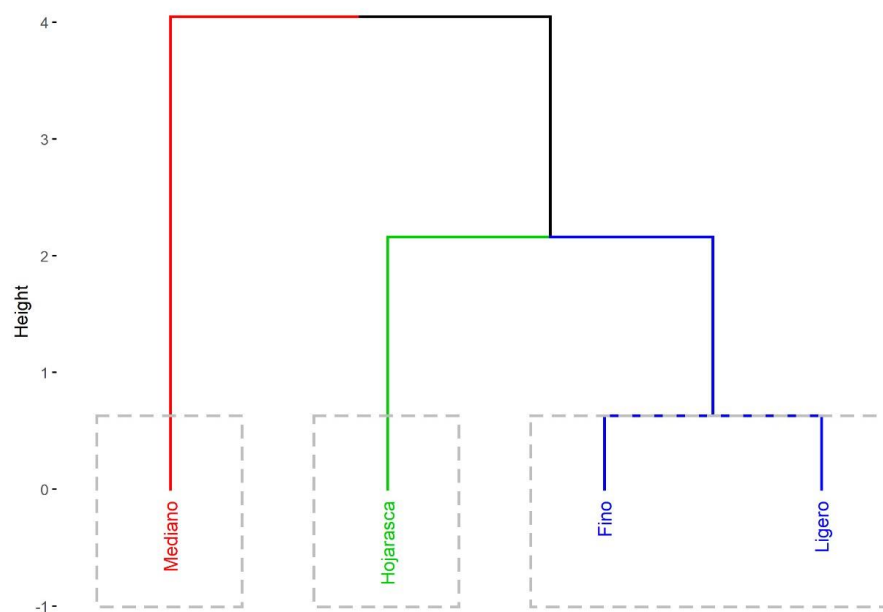
## 6.2. Inflamabilidad de combustibles forestales muertos

La inflamabilidad de los combustibles forestales muertos se realizó bajo condiciones de laboratorio, con contenidos de humedad similares (ANOVA,  $p=0,581$ ;  $\alpha=0,05$ ). En la Tabla 5 se presentan los índices y categorías de inflamabilidad para los cuatro tipos de combustibles forestales muertos por medio del método de Valette (1990) y Hachmi et al. (2011).

**Tabla 5.** Índices y categorías de inflamabilidad por tipo de combustible forestal muerto presente en el bosque nativo del PUFVC por medio de los métodos de Valette (1990) y Hachmi et al. (2011).

Tipo de Combustible	Valette (1990)		Hachmi et al. (2011)	
	Índice de inflamabilidad	Categoría	Índice de inflamabilidad	Categoría
Hojarasca	4	Extremadamente inflamable	9,87	Muy extremadamente inflamable
Finos / Livianos	1	Poco inflamable	7,91	Muy extremadamente inflamable
Pequeños / Ligeros	0	Muy poco inflamable	7,44	Muy extremadamente inflamable
Regular / Mediano	0	Muy poco inflamable	0,40	Muy Poco inflamable

Mediante un análisis clúster de las características de inflamabilidad, por medio de un dendrograma (Figura 7), se encontró tres grupos específicos de combustibles forestales muertos en función de la inflamabilidad. Entre los combustibles finos y ligeros las características de inflamabilidad fueron similares, mientras que la hojarasca y combustibles medianos se clasificaron de manera independiente, siendo muy particulares sus propiedades de inflamabilidad.



**Figura 7.** Análisis de clúster por medio de un dendrograma para la inflamabilidad de los combustibles forestales muertos presentes en el bosque del PUFVC.

## 7. Discusión

### 7.1. Características de la Inflamabilidad

Las características de la inflamabilidad evaluadas en la presente investigación como el tiempo de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama para los cuatro tipos de combustibles forestales muertos se realizan bajo condiciones de laboratorio y con contenidos de humedad entre el 53 % y 59 %, sin diferencias significativas entre estos, es decir con iguales condiciones de humedad. El contenido de humedad es un estado o propiedad importante de los combustibles que controla la inflamabilidad de estos (Kane y Prat, 2018; Neri et al., 2009), y para los combustibles muertos depende mucho del material vegetal que lo conforma y de las condiciones climáticas existentes (Neri et al., 2009; Wong et al., 2007; Hernando y Elvira, 1989). De acuerdo con Wong et al. (2007) cuando los combustibles muertos presentan contenidos de humedad inferiores a 25 % están disponibles para arder. En esta investigación, los contenidos de humedad de los combustibles están entre 53 % y 59 %, no obstante, durante la exposición del combustible a la fuente de calor, estos perdieron la humedad almacenada hasta que generaron llama.

La hojarasca presenta el tiempo de ignición más rápido en comparación a los combustibles finos, ligeros y medianos, lo que es ratificados por Neri et al. (2009) quienes manifiestan que la hojarasca presenta tiempos de ignición más rápidos. La aparición de la llama en los combustibles forestales muertos está relacionado con el contenido de humedad (Wong et al., 2007) y el tamaño y peso del combustible (White y Zipperer, 2010), por lo que el tiempo de ignición se incrementa en combustibles de mayor tamaño y peso, razón por la que los combustibles medianos son los que registran tiempos de ignición mayores, en comparación a la hojarasca que por ser combustibles de menor tamaño y peso requieren tiempos de ignición cortos para generar llama (De Magalhães y Schwilk, 2012). A esta condición de tamaño y peso de los combustibles, se debe considerar la temperatura mínima de ignición a la que debe ser expuesta un combustible para entrar en combustión (White y Zipperer, 2010), pues los combustibles hojarasca, finos y ligeros requieren temperaturas de aproximadamente 350 °C a 375 °C para liberar energía calórica y presentar aparición de la llama, mientras que los combustibles medianos requieren temperaturas cercanas a 458 °C. Adicionalmente, los combustibles muertos finos, ligeros y medianos representados por ramas con diámetros hasta los 7 cm, presentan contenidos de celulosa y lignina que podrían estar afectados por el proceso de descomposición que sufren (De Magalhães y Schwilk, 2012), lo que influye en la ignición,

pues en este proceso de descomposición se pierde en primera instancia la celulosa y posterior a ello la lignina la que casi no produce llama (De Bano et al. 1998).

La sostenibilidad o duración de la llama en los combustibles forestales muertos también está relacionada con el tamaño y peso de los combustibles (White y Zipperer, 2010). La hojarasca presenta una duración de la llama menor (46 segundos) en comparación al resto de combustibles; ratificado por De Magalhães y Schwilk (2012), al sostener que a medida que aumenta el tamaño y peso de los combustibles también lo hace la sostenibilidad, llegando los combustibles medianos a presentar duraciones de llama prolongada por 144 segundos. Este resultado es interesante pues permite inferir que los combustibles de mayor peso y valores de sostenibilidad largos podrían mantener la combustión en un incendio forestal con o sin presencia de una fuente de calor externa (White y Zipperer, 2010). Otros factores por considerar en la sostenibilidad de la llama también lo es la densidad de madera (Behm et al., 2004) y presencia de polímeros en la madera como lignina y celulosa (De Magalhães y Schwilk, 2012), elementos que pueden desempeñar un papel importante en la resistencia al fuego. En la duración de la llama algunos indicadores también a considerar son las altas temperaturas, la duración de la liberación de calor, duración visual de la llama, área quemada y volumen total consumido (Behm et al. 2004).

La combustibilidad se refiere a la velocidad a la que se consume un combustible durante la llama (White y Zipperer, 2010), y en los combustibles forestales muertos el tamaño y peso de estos al parecer también es un factor influyente, pues la hojarasca, con menor tamaño y peso, presenta la velocidad de propagación mayor respecto al resto de combustibles muertos, en especial los medianos que registran una menor combustibilidad. La presencia de sustancias volátiles y restos lignificados en los combustibles forestales, en función de las especies que componen el material muerto, determinan la velocidad de propagación y por lo tanto la inflamabilidad será mayor (Hernando y Elvira, 1989).

La altura de la llama de los combustibles muertos en la investigación presenta valores altos de 64,06 cm en hojarasca y valores bajos de 15,32 cm en combustibles medianos. De acuerdo a White y Zipperer (2010) el tamaño y peso de los combustibles influye en la altura de la llama, lo que se evidencio en esta investigación en los combustibles medianos, al presentar de altura de llamas menores. A esta condición también puede considerarse el contenido de humedad del combustible, con una influencia simple, es decir la altura, longitud y ancho de la llama disminuyen a medida que aumenta el contenido de humedad en los combustibles, como

producto del efecto inhibitor de la humedad en la combustión (Ning et al., 2022). En el estudio de Hachmi et al (2011) consideran a la altura de la llama como una característica para determinar la inflamabilidad de especies vegetales, pues esta podría ser un indicador de la volatilidad de aceites esenciales contenidos principalmente en las hojas vegetales y representa la intensidad en un incendio forestal (Ning et al., 2022).

## **7.2. Inflamabilidad de Combustibles forestales muertos**

La inflamabilidad es la propiedad que posee un vegetal para inflamarse desde que una fuente de calor entra en contacto con él (Hachmi et al., 2011; Ramos, 2010). Los estudios de inflamabilidad de combustibles forestales muertos son muy limitados en especial para combustibles finos, ligeros y medianos, lo que convierte a esta investigación en una de las primeras en generar información de inflamabilidad para combustibles forestales muertos presentes en el bosque andino en la región sur de Ecuador. Las categorías de inflamabilidad estimadas para los diferentes tipos de combustibles, en la presente investigación, son desde muy poco inflamable hasta muy extremadamente inflamable, resultados que demuestran la importancia y el papel que pudieran representar los combustibles forestales muertos frente a un incendio forestal, pues este tipo de combustibles está constituido por una variedad de especies vegetales y bajo condiciones diferentes. Con los métodos de Valette (1990) y Hachmi et al. (2011) se determinan categorías de inflamabilidad diferentes para un mismo combustible, con lo que se ratifica que la inflamabilidad es una propiedad de los combustibles aún en estudio, que no solo depende del tiempo de ignición (Valette, 1990) sino que otras características son influyentes como la sostenibilidad, altura de la llama, combustibilidad y consumabilidad (Hachmi et al., 2011); contenido de humedad del combustible (Kane y Prat, 2018), componentes físico-estructurales y fisiológicos o elementos celulares (White y Zipperer, 2010). La información generada bajo condiciones de laboratorio otorga las pautas para entender el comportamiento del fuego, e iniciar con estudios a gran escala a nivel de especies y ecosistemas.

La hojarasca presenta una categoría de extremadamente inflamable por el método de Valette (1990) porque todos los ensayos son positivos y el tiempo de ignición promedio son rápidos, entre 12 a 17 segundos. Por su parte, por el método de Hachmi et al. (2011) la categoría es muy extremadamente inflamable, superior a lo que se registra con el método de Valette (1990), esto como resultado de la consideración de otras variables como la sostenibilidad y altura de la llama, en especial esta última con valores más altos en comparación al resto de

combustibles. Estudios como el De Magalhães y Schwilk, (2012) ratifican valores altos en altura de la llama de la hojarasca, pues sostienen que al estar formada o constituida por hojas de diferentes especies sería una razón de su alta inflamabilidad.

Para los combustibles finos y ligeros la categoría de inflamabilidad por medio de Valette (1990) es poco inflamable y muy poco inflamable respectivamente, esto como resultado que presentaron un importante número de ensayos negativos, pues según Valette (1990) la inflamabilidad está en función del tiempo de ignición, por lo que a medida que aumenta el tiempo de ignición y disminuye el número de ensayos positivos, la inflamabilidad del combustible es cada vez menor. Esta particularidad se evidencia a medida que aumenta el tiempo de ignición de estos combustibles, en especial al aumentar de tamaño y peso (White y Zipperer, 2010; Wong et al., 2007). Por su parte, con el método de Hachmi et al (2011), los combustibles finos y ligeros presentan la categoría muy extremadamente inflamable, esto como consecuencia que intervienen en el cálculo del índice, la sostenibilidad y altura de la llama. El análisis de conglomerados determina que la inflamabilidad de estos dos combustibles es similar.

Para los combustibles medianos, la categoría de inflamabilidad por medio de Valette (1990) y Hachmi et al. (2011) es de muy poco inflamable, como resultado de presentar valores de tiempo de ignición altos, mayores a 60 segundos, alturas de la llama bajas y tiempos de sostenibilidad largos, lo que caracteriza al combustible con una categoría de inflamabilidad particular, diferente al resto.

La inflamabilidad de los combustibles forestales muertos está determinada por una serie de factores, siendo el contenido de humedad y el tiempo atmosférico las variables más influyentes y que determinan si presentan llama o no ante un posible evento de un incendio forestal. (White y Zipperer, 2010; Petriccione, 2006). Por lo tanto, las condiciones de los combustibles vivos y muertos pueden determinar el futuro de las comunidades vegetales frente a la ocurrencia de incendios, debido a que, en algunas comunidades, las especies inflamables pueden predominar sobre otras, determinando así la inflamabilidad de toda la comunidad vegetal (DFM [Directorio Forestal Maderero], 2018).

Los ecosistemas forestales más vulnerables a incendios son aquellos que presentan precipitaciones bajas, humedad relativa menor al 30 %, elevadas temperaturas y fuertes vientos (Flores et al., 2016), condiciones diferentes a las existentes en el bosque nativo del PUFVC, que se caracteriza por presentar condiciones micro climáticas con altos contenidos de humedad,

no adecuadas para la propagación rápida de un incendio forestal. Sin embargo, un aspecto importante por considerar es la carga de combustibles muertos presentes en el bosque nativo del PUFVC, pues el mismo está constituida por el 89 % de combustibles forestales (finos, livianos, medianos y pesados) y el 11 % por hojarasca (Oña, 2021) y con el conocimiento de la inflamabilidad de estos combustibles, el bosque nativo del PUFVC se convierte en un escenario vulnerable ante la ocurrencia de incendios forestales, más aún cuando los combustibles muertos son los que determinan la ocurrencia y propagación del fuego (Hernando y Elvira, 1989). A esto se suma el paisaje circundante al bosque andino, que está dominado por ecosistemas que han sido y son propensos a ser afectados por incendios forestales como el páramo antrópico, matorral andino, plantaciones forestales de pino y eucalipto.



## 8. Conclusiones

- Los combustibles forestales muertos presentes en el bosque del PUFVC mostraron diferentes características en los tiempos de ignición, sostenibilidad, combustibilidad y altura de la llama, con diferencias significativas entre estos, siendo la hojarasca y los combustibles medianos los que difieren del resto de combustibles, constituyendo las bases para comprender la ecología y comportamiento del fuego con este tipo de combustibles.
- La hojarasca fue el combustible forestal muerto en registrar el tiempo de ignición más rápido (15,84 s), menor sostenibilidad (46,48), mayor valor en combustibilidad (0,21 g/s) y altura de la llama (64,06 cm), y una categoría de inflamabilidad de extremadamente a muy extremadamente inflamable, lo que la convierte en un indicador de peligro en el caso que existiera iniciación del fuego en el bosque montano del PUFVC, debidamente se encuentra en las condiciones necesarias para la combustión.
- Los combustibles forestales muertos finos y ligeros fueron similares en cuanto a las características de inflamabilidad, con valores intermedios en los tiempos de ignición, sostenibilidad y altura de la llama con respecto a la hojarasca y combustibles medianos. La categoría de inflamabilidad fue de poco y muy poco inflamable por el método de Valette (1990) a muy extremadamente inflamable por el método de Hachmi et al. (2011), representando una parte importante en la carga de combustibles del bosque montano con implicaciones altas de ignición y propagación del fuego.
- Los combustibles medianos registraron tiempos de ignición lentos (170,46 s), mayor sostenibilidad (144,74), menor valor en combustibilidad (0,07 g/s) y altura de la llama (15,32 cm), y una categoría de inflamabilidad de muy poco inflamable, lo que la convierte en un indicador de bajo peligro e iniciación del fuego, pero con una alta probabilidad de mantener o sostener el fuego una vez encendidos.
- Las categorías de inflamabilidad determinadas para los combustibles forestales muertos presentes en el bosque nativo del PUFVC son resultados prometedores, pues constituye un importante avance en el conocimiento de las características de los combustibles forestales; y representan el impulso para iniciar el estudio a nivel de especies y ecosistemas.

## **9. Recomendaciones**

- Debido a la ocurrencia de incendios forestales en zonas contiguas al Parque Universitario Francisco Vivar Castro, se recomienda realizar este tipo de investigaciones en los ecosistemas matorral andino y páramo antrópico, debidamente a que son los primeros ecosistemas en ser afectados por la ocurrencia de incendios en áreas externas o aledañas al PUFVC.
- Ampliar el estudio del efecto de variables ambientales y topográficas sobre la inflamabilidad de combustibles muertos.
- Considerar el estudio de la inflamabilidad de combustibles muertos a lo largo del año, para conocer si existen cambios en la inflamabilidad de estos debido al cambio en condiciones ambientales, principalmente por el clima.

## 10. Bibliografía

- Agama, V. (2016). Los incendios forestales vulneran los derechos de la naturaleza en el Distrito Metropolitano de Quito, en la Parroquia de Puembo en el año 2015. Universidad Nacional Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7391/1/T-UCE-0013-Ab-347.pdf>
- Aguirre, Z., y Yaguana, C. (2014). Parque Universitario de Educación Ambiental y Recreación. Universidad Nacional de Loja, Loja.
- Albornoz, S., Chereau, J., y Araya, S. (2016). El Fuego y los Incendios. Santiago, Chile: Academia Nacional de Bomberos de Chile. Obtenido de [http://www.anb.cl/documentos\\_sitio/81229\\_4\\_Guia\\_Fuego.pdf](http://www.anb.cl/documentos_sitio/81229_4_Guia_Fuego.pdf)
- Anchaluisa, S., y Suárez, E. (2013). Efectos del fuego sobre la estructura, microclima y funciones ecosistémicas de plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; Myrtaceae) en el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2), págs. B14-B23. Obtenido de <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/134/136>
- Arellano, L., y Castillo, C. (2014). Efecto de los incendios forestales no controlados en el conjunto de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en un bosque templado del centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* , 85 (3), 854-865.
- Ávila, D. (07 de Julio de 2022). Estimación y mapeo de cargas de combustibles forestales. Obtenido de <https://www.gob.mx/inifap/articulos/estimacion-y-mapeo-de-cargas-de-combustibles-forestales?idiom=es>
- Behm, A. L., Duryea, M. L., Long, A. J., y Zipperer, W. C. (2004). Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems and implications for the wildland—Urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 13(3), 355. <https://doi.org/10.1071/WF03075>
- Bonilla, R. (2001). Guía técnica en prevención y control de incendios forestales. Guatemala: PROPETEN. Obtenido de [https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/guia\\_incendios\\_Guat.pdf](https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/guia_incendios_Guat.pdf)
- Botta, N. (2013). El fuego. Proteger. Obtenido de <https://fdocuments.ec/reader/full/18-el-fuego-1a-edicion-marzo2013>

- Brown, J., Oberheu, R. D., y Johnston, C. M. (1982). Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West (INT-GTR-129; p. INT-GTR-129). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest, and Range Experiment Station. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-129>
- CAF. (05 de mayo de 2020). Ecuador fortalecerá la prevención de incendios forestales en las zonas más vulnerables. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2020/05/ecuador-fortalecera-la-prevencion-de-incendios-forestales-en-las-zonas-mas-vulnerables/>
- Carrasco, Y., Ramos, M., Mesa, J., Caso, Y., y Martínez, L. (2016). Inflamabilidad de especies vegetales del ecosistema de pinares. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*,4(1), 5.
- Castillo, M., Pedernera, P., y Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, 19(3,4), 44-53. Obtenido de [http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb\\_.pdf](http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/03/ID-05-2003-Incendios-forestes-y-M.amb_.pdf)
- Cochrane, M. A. (2009). *Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics* (pp. 25-62). Chichester: Springer.
- CONAFOR. (2010). *Incendios Forestales guía práctica para comunicadores*. San Juan de Ocotán. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>
- Crespo, G. (03 de noviembre de 2015). Factores que influyen en el reciclaje de los nutrientes en el ecosistema de pastizal permanente y avances en el desarrollo de su modelación. Obtenido de <https://www.engormix.com/ganaderia-leche/articulos/factores-influyen-reciclaje-nutrientes-t32776.htm>
- Crespo, G. (2013). El reciclaje de nutrientes y su impacto en sistemas ganaderos en el occidente de Cuba. *Instituto de Ciencia Animal*, 213.
- De Bano LF, Neary DG, Ffolliott, PF (1998) *Fire's effects on ecosystems*. John Wiley y Sons. New York. 333 pp.

- De Magalhães, R. M. Q., y Schwilk, D. W. (2012). Leaf traits and litter flammability: Evidence for non-additive mixture effects in a temperate forest. *Journal of Ecology*, 100(5), 1153–1163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.01987.x>
- DFM. (26 de Febrero de 2018). Inflamabilidad de las Plantas e incendios forestales. Obtenido de <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/inflamabilidad-las-plantas-e-incendios-forestales.html>
- Díaz, E. (2015). Construcción de Mapas de Combustible Forestal para Detectar el Peligro de Incendio en un Bosque de Pino-Encino. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, Linares Nuevo León, México. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/9390/1/1080214888.pdf>
- Díaz, E., González, M., Jiménez, J., Treviño, E., y Ávila, D. (2012). Caracterización de Combustibles Forestales Mediante un Muestreo Directo en Plantaciones Forestales. U.S Department of Agriculture, Forest Service. [https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr245/es/psw\\_gtr245\\_426.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_426.pdf)
- Dimitrakopoulos, A., y Papaioannou, K.K. (2001). Flammability Assessment of Mediterranean Forest Fuels. *Fire Technology* 37, pp143–152. <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>
- Flores, J., Benavides, J., Leal, H., Vega, D., Valdez, C., y Casillas, U. (2016). Descripción de variables para definición de peligro de incendios forestales de peligro de incendios forestales. Jalisco, México. Obtenido de <https://old-snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Incendios/Insumos%20Manejo%20Fuego/Areas%20prioritarias/Definicion%20de%20Peligro.pdf>
- Giler, L. (2020). Comportamiento del fuego en combustibles superficiales de una plantación de Eucalyptus sp. en Santa Ana, Manabí, Ecuador. Jipijapa: EC, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, 2020. 52 p. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5586/1/iniapeptesisLGILER2020.pdf>

- Gill, A. M., y Moore, P. H. R. (1996). Ignitibility of leaves of Australian plants. Centre for Plant Biodiversity Research, CSIRO Plant Industry. [http://aff.antl.com.au/wp-content/uploads/Gill\\_ignitibility\\_final.pdf](http://aff.antl.com.au/wp-content/uploads/Gill_ignitibility_final.pdf)
- Goudsblom, J. (1995). Fuego y civilización. Andres Bello. Santiago de Chile.
- Hachmi, M., Sesbou, A., Benjelloun, H., El Handouz, N., y Bouanane, F. (2011). A Simple Technique to Estimate the Flammability Index of Moroccan Forest Fuels. *Journal of Combustion*, 2011, e263531. <https://doi.org/10.1155/2011/263531>
- Hernando, C., y Elvira, M. (1989). Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque (Vol.12). Laboratorio de Incendios Forestales CIT-INIA.
- Kane, J., y Prat, N. (2018). Fuel Moisture (pp. 1–13). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_115-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_115-1)
- Labanda, C. (2021). Propuesta metodológica para determinar los niveles de inflamabilidad de los combustibles forestales muertos del bosque siempre verde montano, parroquia Imbana, Zamora Chinchipe. Informe producto 2.
- Martin, R., Gordon, D., Gutierrez, M., Lee, D., Molina, D., Schroeder, R., Sapsis, D., Stephens, S., y Chambers, M. (1994). Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation. Department of Environmental Science. University of California. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3999.3680>
- Montes, C. y Sala, O. (2007). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Ecosistemas*, 16 (3), 134-144.
- Nájera, A. (2015). Curso de evaluación, cuantificación y manejo de combustibles forestales en plantaciones forestales. Panamá. Obtenido de [http://www.itto.int/files/itto\\_project\\_db\\_input/2902/Technical/Manual%20del%20participante%20CURSO%20MANEJO%20COMBUSTIBLES%20PAN%20F.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2902/Technical/Manual%20del%20participante%20CURSO%20MANEJO%20COMBUSTIBLES%20PAN%20F.pdf)
- Nava, L., y Jardel, E. (2020). Manual de prevención física de incendios forestales (7 ed.). Jalisco, México. Obtenido de [https://prevenciondeincendios.jalisco.gob.mx/descarga/Manual\\_de\\_preencion\\_fisica\\_de\\_incendios\\_forestales.pdf](https://prevenciondeincendios.jalisco.gob.mx/descarga/Manual_de_preencion_fisica_de_incendios_forestales.pdf)

- Neri, A., Rodríguez, D., y Contreras, R. (2009). Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Scielo*, 25(2), 121-132. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792009000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792009000200002)
- Ning, J., Yang, G., Liu, X., Geng, D., Wang, L., Li, Z., Zhang, Y., Di, X., Sun, L., y Yu, H. (2022). Effect of fire spread, flame characteristic, fire intensity on particulate matter 2.5 released from surface fuel combustion of *Pinus koraiensis* plantation– A laboratory simulation study. *Environment International*, 166. ISSN 0160-4120
- Oña, E. (2021). Determinación de la cantidad de combustibles forestales presentes en el bosque nativo del Parque Universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador” . Universidad Nacional de Loja, Loja.
- Pausas, J. (2012). *Incendios forestales una visión desde la ecología*. Madrid, España.
- Petriccione, M. (2006). *Infiammabilità della lettiera di iverse specie vegetali di ambiente Mediterraneo*. Università Degli Studi Di Napoli Federico II, Dipartimento di Biologia Strutturale e Funzionale. Obtenido de [http://www.fedoa.unina.it/1355/1/Petriccione\\_-\\_Biologia\\_applicata.pdf](http://www.fedoa.unina.it/1355/1/Petriccione_-_Biologia_applicata.pdf)
- Piñeiro, F. (2022). *Incendios forestales*. Obtenido de <https://fahho.mx/incendios-forestales/>
- Ramos , M. (2010). *Manejo del Fuego (Primera edición)*. Editorial Felix Barela.
- Rochas, L. (1994). *Inflammabilité et indice de siccité de la bruyere arborescente et de l'arbousier*. Institut National de la Recherche Agronomique. <http://www.eufirelab.org/toolbox2/library/upload/79.pdf>
- Santacruz, A. (2018). *Caracterización de la inflamabilidad de especies leñosas en el chaco semiárido de argentina, a partir del análisis de rasgos funcionales*. UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS, Bogotá.
- Santos, R., Fernández, V., Rey, E., y Inés, J. (2014). *Manual de extinción de incendios forestales para cuadrillas*. España: Sorles León.
- SNGR. (2020). *Informe de Situación – Incendios Forestales*. Quito. Obtenido de [https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2020/11/Informe-de-Situacion- No-005-Incendios-Forestales-08112020\\_17h00.pdf](https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2020/11/Informe-de-Situacion- No-005-Incendios-Forestales-08112020_17h00.pdf)

- USAID. (2006). Curso de Operaciones de Prevención y Control de Incendios Forestales. Programa IRg/USAID/OFDALAC de Capacitación y Asistencia Técnica. <https://scms.usaid.gov/sites/default/files/documents/1866/MR-%20COPCIF.pdf>
- Valette, J.C. (1990). “Inflammabilites des esp´eces foresti`eres m`edi-terraneennes. Cons´equences sur la combustibilit´e des forma-´tions forestieres,” `Revue Foresti`ere Franc,aise, vol. 42, pp. 76–92.
- Vele, Y. (2023). Inflamabilidad de especies forestales representativas del bosque andino en el Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja. Universidad Nacional de Loja, Loja.
- Vélez, R. (2000). Combustibles forestales: Combustibilidad. En: La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y Experiencias. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. España. 716 pp.
- White, R. H., y Zipperer, W. C. (2010). Testing and classification of individual plants for fire behaviour: Plant selection for the wildland–urban interface. *International Journal of Wildland Fire* 19:213–227, 19, 213–227.
- Wong, J. C., y Villers, M. de L. (2007). Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: Un estudio en el Parque Nacional La Malinche. En *Investigaciones geográficas* (pp. 87–103). Scielomx
- Xelhuantzi, J., Flores, J., y Chávez, A. (2011). Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3), 37-52. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/634/63438956004.pdf>



## 11. Anexos

**Anexo 1.** Valores de contenido de humedad para los cuatro tipos de combustibles forestales muertos

<b>Nro.</b>	<b>Combustible</b>	<b>Código</b>	<b>Peso húmedo (gr)</b>	<b>peso seco (gr)</b>	<b>Contenido humedad %</b>	<b>Promedio % Humedad</b>
1	Hojarasca	parcela Q (11-1)	273	92	66,3	55,68
2	Hojarasca	parcela x (11-2)	502,4	131,9	73,7	
3	Hojarasca	parcela Q (12-2)	206	94,4	54,2	
4	Hojarasca	parcela x (11-1)	214,9	119,3	44,5	
5	Hojarasca	parcela P (11-2)	392,2	160,1	59,2	
6	Hojarasca	parcela R (12-2)	270,7	82,6	69,5	
7	Hojarasca	parcela w (11-1)	177,9	69,2	61,1	
8	Hojarasca	parcela F (12-1)	45,6	37,9	16,9	
9	Fino	F#1	200	102,3	48,9	53,73
10	Fino	F#2	200	106,9	46,6	
11	Fino	F#3	200	108,7	45,7	
12	Fino	F#4	200	102,7	48,7	
13	Fino	F#5	200	102,8	48,6	
14	Fino	F#6	200	91	54,5	
15	Fino	F#7	200	95	52,5	
16	Fino	F#8	200	90,4	54,8	
17	Fino	F#9	200	89,4	55,3	

18	Fino	F#10	200	78,8	60,6	55,85
19	Fino	F#11	200	72,8	63,6	
20	Fino	F#12	225,7	79,3	64,9	
21	Ligero	L#1	248,1	127,6	48,6	
22	Ligero	L#2	234,5	100,7	57,1	
23	Ligero	L#3	227,6	109,6	51,8	
24	Ligero	L#4	241,2	118,8	50,7	
25	Ligero	L#5	224,9	86,1	61,7	
26	Ligero	L#6	272,7	122,6	55	
27	Ligero	L#7	262,5	96,7	63,2	
28	Ligero	L#8	267,3	106,3	60,2	
29	Ligero	L#9	251,5	106,5	57,7	
30	Ligero	L#10	253,3	105,4	58,4	59,87
31	Ligero	L#11	266,7	129,9	51,3	
32	Ligero	L#12	233,1	106	54,5	
33	Mediano	M#1	394,1	221,6	43,8	
34	Mediano	M#2	268,3	147,5	45	
35	Mediano	M#3	391,3	149,2	61,9	
36	Mediano	M#4	368,8	117,8	68,1	
37	Mediano	M#5	272,8	74,2	72,8	
38	Mediano	M#6	311,3	109,4	64,9	
39	Mediano	M#7	291,3	188,8	35,2	
40	Mediano	M#8	296,8	116,7	60,7	
41	Mediano	M#9	362,4	170,8	52,9	
42	Mediano	M#10	382,9	112,8	70,5	
43	Mediano	M#11	354,6	111,8	68,5	
44	Mediano	M#12	398,1	103,2	74,1	

**Anexo 2.** Script del análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de humedad de los cuatro tipos de combustibles forestales muertos

##### Análisis ANOVA para la variable Contenido de Humedad de los combustibles forestales muertos

```

# Directorio de trabajo

setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/10 ciclo/Tesis/base de datos/r")

# Conjunto de datos

datos <- read.csv("CH.csv", header= TRUE, dec=".", sep=",")

# Gráficos cuantil o QQ plot

par(mfrow = c(2, 2))

qqnorm(datos$Hojarasca, pch=20, main='QQplot para hojarasca')

qqline(datos$Hojarasca)

qqnorm(datos$Fino, pch=20, main='QQplot para combustible fino')

qqline(datos$Fino)

qqnorm(datos$Ligero, pch=20, main='QQplot para combustible ligero')

qqline(datos$Ligero)

qqnorm(datos$Mediano, pch=20, main='QQplot para combustible Mediano')

qqline(datos$Mediano)

graphics.off()

# Aplicar pruebas de normalidad Shapiro.test

Norm_hojarasca <- shapiro.test(datos$Hojarasca) # Shapiro.test

Norm_hojarasca

Norm_Fino <- shapiro.test(datos$Fino)

Norm_Fino

Norm_Ligero <- shapiro.test(datos$Ligero)

Norm_Ligero

Norm_Mediano <- shapiro.test(datos$Mediano)

Norm_Mediano

```

```

# Prueba de homocedasticidad de varianzas

# visualización gráfica

par(mfrow = c(2, 2))

  boxplot(datos$Hojarasca, main ="Hojarasca")

  boxplot(datos$Fino, main ="Combustible fino")

  boxplot(datos$Ligero, main ="Combustible ligero")

  boxplot(datos$Mediano, main ="Combustible mediano")

graphics.off()

# Prueba estadística de Levene

  library(car) # cargamos el paquete car

# Cargamos los datos con dos campos (Variable agrupamiento, datos)

  datos2 <- read.csv("Contenido.csv", header= TRUE, dec=".", sep=",")

# Convertimos en factor la variable de agrupamiento

  combustibles <- as.factor(datos2$Combustible)

# Aplicamos test de Levene, leveneTest(var numero,var factor) primero la variable numérica,
luego la variable factor

  leveneTest(datos2$CH, combustibles)

# Cálculo de ANOVA

  anova <- aov(CH~Combustible, data=datos2)

  summary(anova)

```

### **Anexo 3.** Script de la prueba no paramétrica Kruskal Wallis para el tiempo de ignición

```
## Definir directorio de trabajo

##Analis estadístico de tiempo de ignición##

setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/10 ciclo/Tesis/base de datos/r")

## Cargar la base de datos

datos <- read.csv("tiempo_ignicion.csv", header = TRUE, sep=";", dec = ",")

datos

## Crear subconjunto de datos por combustible

Hojarasca<-datos[1:50,1:2]

finos<-datos[51:100,1:2]

ligeros <-datos[101:150,1:2]

medianos <-datos[151:200,1:2]

# Aplicar pruebas de normalidad Shapiro.test

Norm_hojarasca <- shapiro.test(Hojarasca$indice) # Shapiro.test

Norm_hojarasca

Norm_finos <- shapiro.test(finos$indice) # Shapiro.test

Norm_finos

Norm_ligeros <- shapiro.test(ligeros$indice) # Shapiro.test

Norm_ligeros

Norm_medianos <- shapiro.test(medianos$indice) # Shapiro.test
```

Norm\_medianos

```
# homocedasticidad por medio de prueba estadística de Levene
```

```
# cargamos el paquete car, si no lo tienes debes instalarlo
```

```
library(car)
```

```
# convertimos en factor la variable de agrupamiento
```

```
homocedasticidad <- as.factor(datos$Categoria)
```

```
# aplicamos test de Levene (variable numérica, variable factor)
```

```
leveneTest(datos$indice, homocedasticidad)
```

```
#####Prueba de Kruskal Wallis##
```

```
kruskal.test(indice ~ Categoria, data = datos)
```

```
### prueba posthoc Holm
```

```
pairwise.wilcox.test(x = datos$indice, g = datos$Categoria, p.adjust.method = "bonferroni" )
```

#### **Anexo 4.** Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la sostenibilidad

```
## Definir directorio de trabajo

setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/10 ciclo/Tesis/base de datos/r")

## Cargar la base de datos

datos <- read.csv("sostenibilidad.csv", header = TRUE, sep=";", dec = ",")

datos

## Crear subconjunto de datos por combustible

Hojarasca<-datos[1:50,1:2]

finos<-datos[51:100,1:2]

ligeros <-datos[101:150,1:2]

medianos <-datos[151:200,1:2]

# Aplicar pruebas de normalidad Shapiro.test

Norm_hojarasca <- shapiro.test(Hojarasca$indice) # Shapiro.test

Norm_hojarasca

Norm_finos <- shapiro.test(finis$indice) # Shapiro.test

Norm_finos

Norm_ligeros <- shapiro.test(ligeros$indice) # Shapiro.test

Norm_ligeros

Norm_medianos <- shapiro.test(medianos$indice) # Shapiro.test

Norm_medianos

# Homocedasticidad por medio de prueba estadística de Levene

# Cargamos el paquete car, si no lo tienes debes instalarlo

library(car)

# Convertimos en factor la variable de agrupamiento
```

```

homocedasticidad <- as.factor(datos$Categoria)

# Aplicamos test de Levene (var numero,var factor)

leveneTest(datos$indice, homocedasticidad)

#####Prueba de Kruskal Wallis

kruskal.test(indice ~ Categoria, data = datos)

### prueba posthoc Holm

pairwise.wilcox.test(x = datos$indice, g = datos$Categoria, p.adjust.method = "bonferroni" )

```

**Anexo 5.** Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la combustibilidad

```

## Definir directorio de trabajo

##Analis estadístico de tiempo de ignición

setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/10 ciclo/Tesis/base de datos/r")

## Cargar la base de datos

datos <- read.csv("combustibilidad.csv", header = TRUE, sep=";", dec = ",")

datos

## Crear subconjunto de datos por combustible

Hojarasca<-datos[1:50,1:2]

finos<-datos[51:100,1:2]

ligeros <-datos[101:150,1:2]

medianos <-datos[151:200,1:2]

# Aplicar pruebas de normalidad Shapiro.test

Norm_hojarasca <- shapiro.test(Hojarasca$indice) # Shapiro.test

```



```
Norm_hojarasca
```

```
Norm_finos <- shapiro.test(finos$indice) # Shapiro.test
```

```
Norm_finos
```

```
Norm_ligeros <- shapiro.test(ligeros$indice) # Shapiro.test
```

```
Norm_ligeros
```

```
Norm_medianos <- shapiro.test(medianos$indice) # Shapiro.test
```

```
Norm_medianos
```

```
# homocedasticidad por medio de prueba estadística de Levene
```

```
# cargamos el paquete car, si no lo tienes debes instalarlo
```

```
library(car)
```

```
# convertimos en factor la variable de agrupamiento, Nombre científico
```

```
homocedasticidad <- as.factor(datos$Categoria)
```

```
# aplicamos test de Levene, (var numero,var factor)
```

```
levneTest(datos$indice, homocedasticidad)
```

```
#####Prueba de Kruskal Wallis
```

```
kruskal.test(indice ~ Categoria, data = datos)
```

```
### prueba posthoc Holm
```

```
pairwise.wilcox.test(x = datos$indice, g = datos$Categoria, p.adjust.method = "bonferroni" )
```

**Anexo 6.** Script del análisis de estadístico prueba de Kruskal Wallis para la altura de las llamas

```
## Definir directorio de trabajo
```

```
##Analis estadístico de tiempo de ignición##
```

```
setwd("C:/Users/Usuario/Desktop/10 ciclo/Tesis/base de datos/r")
```

```
## Cargar la base de datos
```

```
datos <- read.csv("altura_llamas.csv", header = TRUE, sep=";", dec = ",")
```

```
datos
```

```
## Crear subconjunto de datos por combustible
```

```
Hojarasca<-datos[1:50,1:2]
```

```
finos<-datos[51:100,1:2]
```

```
ligeros <-datos[101:150,1:2]
```

```
medianos <-datos[151:200,1:2]
```

```
# Aplicar pruebas de normalidad Shapiro.test
```

```
Norm_hojarasca <- shapiro.test(Hojarasca$indice) # Shapiro.test
```

```
Norm_hojarasca
```

```
Norm_finos <- shapiro.test(finosa$indice) # Shapiro.test
```

```
Norm_finos
```

```

Norm_ligeros <- shapiro.test(ligeros$indice) # Shapiro.test

Norm_ligeros

Norm_medianos <- shapiro.test(medianos$indice) # Shapiro.test

Norm_medianos

# homocedasticidad por medio de prueba estadística de Levene

# cargamos el paquete car, si no lo tienes debes instalarlo

library(car)

# convertimos en factor la variable de agrupamiento, Nombre científico
homocedasticidad <- as.factor(datos$Categoria)

# aplicamos test de Levene, (var numero,var factor)

leveneTest(datos$indice, homocedasticidad)

#####Prueba de Kruskal Wallis

kruskal.test(indice ~ Categoria, data = datos)

### prueba posthoc Holm

pairwise.wilcox.test(x = datos$indice, g = datos$Categoria, p.adjust.method = "bonferroni" )

```

**Anexo 7.** Estadísticas descriptivas de los combustibles forestales muertos. TI: tiempo de ignición, TC: sostenibilidad, C: combustibilidad, FH: altura de la llama.

<b>Combustible</b>	<b>Estadística descriptiva</b>	<b>TI</b>	<b>TC</b>	<b>C</b>	<b>FH</b>
<b>Hojarasca</b>	Media	15,84	46,48	0,21	64,06
	Error típico	1,03	2,27	0,01	1,34
	Mediana	14,00	43,50	0,20	62,50
	Moda	10,00	35,00	0,25	57,00
	Desviación estándar	7,31	16,08	0,07	9,49
	Varianza de la muestra	53,48	258,66	0,00	90,02
	Curtosis	-0,51	0,22	-0,47	-0,67
	Coefficiente de asimetría	0,61	0,81	0,46	-0,17
	Rango	28,00	65,00	0,26	38,00
	Mínimo	3,00	24,00	0,10	42,00
	Máximo	31,00	89,00	0,36	80,00
	Suma	792,00	2324,00	10,40	3203,00
	Cuenta	50,00	50,00	50,00	50,00
	Nivel de confianza (95,0%)	2,08	4,57	0,02	2,70
<b>Fino</b>	Media	35,86	96,16	0,10	45,44
	Error típico	2,59	3,68	0,00	0,70
	Mediana	32,00	93,00	0,10	46,00
	Moda	24,00	72,00	0,12	47,00
	Desviación estándar	18,29	26,01	0,03	4,97
	Varianza de la muestra	334,57	676,59	0,00	24,74
	Curtosis	2,41	2,06	2,68	0,45
	Coefficiente de asimetría	1,33	0,95	1,01	-0,57
	Rango	91,00	144,00	0,16	24,00
	Mínimo	9,00	45,00	0,05	30,00

	Máximo	100,00	189,00	0,20	54,00
	Suma	1793,00	4808,00	5,07	2272,00
	Cuenta	50,00	50,00	50,00	50,00
	Nivel de confianza (95,0%)	5,20	7,39	0,01	1,41
<b>Ligero</b>	Media	51,16	117,52	0,09	39,46
	Error típico	5,34	4,55	0,00	1,00
	Mediana	38,00	119,50	0,08	41,00
	Moda	38,00	121,00	#N/D	45,00
	Desviación estándar	37,73	32,14	0,03	7,06
	Varianza de la muestra	1423,32	1032,95	0,00	49,89
	Curtosis	2,54	1,06	2,20	0,00
	Coefficiente de asimetría	1,62	0,49	1,35	-0,63
	Rango	165,00	155,00	0,13	31,00
	Mínimo	7,00	52,00	0,05	20,00
	Máximo	172,00	207,00	0,18	51,00
	Suma	2558,00	5876,00	4,31	1973,00
	Cuenta	50,00	50,00	50,00	50,00
	Nivel de confianza (95,0%)	10,72	9,13	0,01	2,01
<b>Mediano</b>	Media	170,46	144,74	0,07	15,32
	Error típico	12,39	12,94	0,01	0,77
	Mediana	181,50	119,50	0,05	14,00
	Moda	180,00	233,00	#N/D	12,00
	Desviación estándar	87,62	91,48	0,06	5,42
	Varianza de la muestra	7677,56	8368,85	0,00	29,32
	Curtosis	-0,51	-1,00	2,77	2,10
	Coefficiente de asimetría	0,43	0,44	1,87	1,07

Rango	329,00	343,00	0,23	28,00
Mínimo	46,00	21,00	0,02	7,00
Máximo	375,00	364,00	0,26	35,00
Suma	8523,00	7237,00	3,69	766,00
Cuenta	50,00	50,00	50,00	50,00
Nivel de confianza (95,0%)	24,90	26,00	0,02	1,54

**Anexo 8. Certificado de traducción**

Cuenca, 16 de mayo de 2023

Lic. Luisa Alexandra Morocho Angamarca, Mg.  
**DOCENTE DE LA UNIDAD EDUCATIVA SAN BARTOLOME**

**CERTIFICA:**

Que el documento aquí compuesto es fiel traducción del idioma español al inglés del resumen de la tesis titulada “INFLAMABILIDAD DE COMBUSTIBLES FORESTALES MUERTOS PRESENTES EN EL BOSQUE ANDINO DEL PARQUE UNIVERSITARIO “FRANCISCO VIVAR CASTRO”, LOJA, ECUADOR.” del Sr. Jackson Alejandro Troya Abad, egresado de la carrera de Ingeniería Forestal de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

Lo certifico en honor a la verdad y autorizo al interesado hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga.



Luisa Alexandra Morocho Angamarca,  
**Licenciada en Ciencias de la Educación mención Idioma Inglés**  
**1105212474**