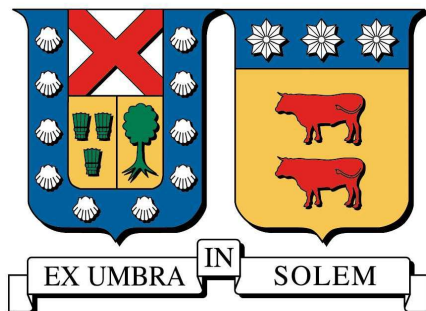


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



**APLICACIÓN DE UNA PAVESA INCANDESCENTE IDEALIZADA
PARA DETERMINAR EL RETARDO EN EL TIEMPO DE IGNICIÓN
DE HOJAS *EUCALYPTUS GLOBULUS***

GABRIELA MORENO CERLIANI

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	DR. ANDRÉS FUENTES CASTILLO
PROFESOR CORREFERENTE	:	DR. RODRIGO DEMARCO BULL
PROFESOR CORREFERENTE EXTERNO	:	DR. PEDRO RESZKA CABELLO

NOVIEMBRE 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi esposo y compañero de vida Manuel F., por su apoyo incondicional de manera emocional e intelectual, quien me ha brindado aliento y motivación para seguir adelante en los momentos más difíciles. También quiero agradecer a mis padres Viviana y Carlos, por los consejos, valores y ayuda brindada a lo largo de mi vida y en este proceso en particular. A mis hermanos Carlos y Elizabeth por saber entender la situación que conlleva la inversión de tiempo para poder alcanzar un futuro mejor.

También quisiera agradecer a mis profesores, Andrés Fuentes y Rodrigo Demarco, por el apoyo y clases entregadas, las cuales fueron fundamentales para este trabajo. A Carlos A., Francisco V. y Pablo P. por su apoyo, en las jornadas de campañas experimentales, de análisis de información, orientación y ayuda en cada paso.

Finalmente, agradezco a las distintas personas que contribuyeron en cada paso del proceso y que fueron entregando motivación, conocimiento y consejos.

Mis sinceros agradecimientos a cada uno de ellos.

Gabriela.

RESUMEN EJECUTIVO

El aparato experimental, previamente validado y aceptado por la comunidad científica, "The Idealized-Firebrand Ignition test" (I-FIT), fue usado para examinar el retardo en el tiempo de ignición de una cama vegetal compuesta por hojas de *Eucalyptus globulus* (Labill.). La cantidad de capa de combustible usada para su evaluación osciló entre una fracción en volumen de $\alpha = 0,03 - 0,05 - 0,07$ dichos valores se esperan por ser encontrados en camas vegetales del bosque Chileno. Adicionalmente, un modelo teórico previamente aceptado y validado por la comunidad científica, proporcionó información que permitió describir el calentamiento e ignición de las camas vegetales basadas en la teoría de ignición. Este modelo fue originalmente desarrollado para camas vegetales de acículas de pino, que consideran la penetración de la radiación a la matriz porosa. Además, el modelo teórico es capaz de predecir con precisión el retardo en el tiempo de ignición para distintos valores de α . Sin embargo, muestra una precisión con grado de incertidumbre para la evolución de la temperatura. Dado lo anterior, esto explica la larga variabilidad observada para las hojas de eucalyptus.

Palabras Clave: Incendios forestales, Fuego de detección, modelo térmico, tiempo de ignición

ABSTRACT

The Idealized-Firebrand Ignition Test (I-FIT) protocol was used to evaluate the piloted ignition delay times of fuel beds composed of leaves of *Eucalyptus globulus* (Labill.). The amount of fuel layer used for evaluation ranged between the fraction volume (α) of 0.03 to 0.07 which are values expected to be found in forest bed fuels. A theoretical model was developed to describe the heating and ignition of the fuel beds, based on the thermal ignition theory. The model, which was originally developed for pine needle beds, considers the penetration of radiation to the porous matrix. The model is able to accurately predict the ignition delay time for different values of α , but shows a poorer accuracy for the temperature evolution. This is explained by the large variability observed for the *Eucalyptus* leaves.

Keywords: Wildfires, Spotting fires, Thermal model, Ignition time

Lista de Símbolos

Nomenclatura

A	área (m^2)
C_p	calor específico
G	Radiación incidente local en la dirección radial (W/m^2)
h	Entalpía (J/kg)/ coeficiente convectivo ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
I	intensidad radiativa (W/m^2)
k	conductividad térmica del material ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
K	función modificada de Bessel de segunda clase
l_z	Altura de la muestra (m)
m	masa (kg)
q	calor (J)
r	radio (mm)
t	tiempo (s)
T	temperatura (K)
u	Velocidad radial (m/s)
v	vector de velocidad (m/s)
	volumen (cm^3)
x	dimensión cartesiana

Letras griegas

α	fracción de volumen (-)
ε	emisividad
κ	coeficiente de absorción (m^{-1})
η	pérdida de masa normalizada
ρ	densidad (g/ml)
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$)
	desviación estándar de la muestra (a.u.)
θ	dimensión cilíndrica del ángulo azimutal (rad)
ω	relación superficie-volumen (m^{-1})

Sub-índices

∞	ambiente
<i>aire</i>	aire
<i>bb</i>	Cuerpo negro
	(error) aparente
<i>basket</i>	portamuestras
<i>comb</i>	Combinado
<i>cond</i>	conducción
<i>conv</i>	convección
<i>cri</i>	crítico
<i>fuel</i>	material combustible
<i>g</i>	fase gaseosa
<i>i</i>	interior
<i>ig</i>	ignición
<i>inc</i>	incidente
<i>o</i>	exterior
<i>R</i>	radiativo
<i>r</i>	radiación
<i>s</i>	fase sólida
	superficie
<i>T</i>	total

Súper-índices

$()''$	por unidad de superficie
$()'''$	por unidad de volumen
$()\dot{}$	por unidad de tiempo
$()^*$	normalizada
$()\bar{}$	valor medio

Índice de Contenidos

1. Introducción y Antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.2.1. Incendios Forestales	3
1.2.2. Incendios Forestales en Chile	3
1.3. Vegetación nacional y especie: Eucalyptus Globulus	5
1.4. Motivación	8
1.5. Alcance	8
1.6. Objetivos	10
1.6.1. Objetivo General	10
1.6.2. Objetivos Específicos	10
2. Estado del Arte	11
3. Marco Teórico	14
3.1. Incendios Forestales	14
3.1.1. Clasificación de Incendios Forestales	14
3.1.2. Incendios de superficie	14
3.1.3. Incendios de subsuelo	14
3.1.4. Incendios de copa	14
3.1.5. Mecanismos de Propagación	15
3.1.5.1. Propagación Superficial	15
3.1.5.2. Propagación en Copas	16
3.1.5.3. Propagación por Spotting	16
3.2. Caracterización de la Biomasa	16
3.2.1. Densidad de Masa	17
3.2.2. Densidad Aparente	17
3.2.3. Packing Ratio	17
3.2.4. Porosidad	18
3.2.5. Fracción en volumen	18
3.2.6. Relación Superficie–Volumen	18
3.3. Mecanismos de Transferencia de Calor	19
3.3.1. Conducción	19
3.3.2. Convección	19
3.3.3. Radiación	20
3.4. Teoría de la Ignición de Sólidos	21
3.4.1. Ignición Piloteada	22
3.4.2. Ignición Espontánea	22
3.4.3. Términos a considerar en la Ignición	23
3.4.3.1. Charring	23
3.4.3.2. Flujo crítico de Ignición $\dot{q}_{inc,cri}''$	23
3.4.3.3. Temperatura T_{ig} y Tiempo de Ignición t_{ig}	23
3.4.4. Aproximación Thermally Thin	24
3.4.5. Aproximación Thermally Thick	25
4. Metodología Experimental	28
4.1. Descripción general	28
4.2. Selección y recolección de la muestra	28

4.3. Caracterización de la muestra	28
4.4. Montaje experimental	30
4.5. Preparación de la muestra	31
4.6. Procedimiento experimental	34
4.6.1. Determinación de Temperatura	35
4.6.2. Determinación del Tiempo de Ignición	35
4.6.3. Determinación del Flujo Crítico Incidente	36
5. Modelo Analítico	37
5.1. Formulación general	37
5.2. Modelo radiativo	38
5.3. Modelo Espacio-Promediado	39
5.4. Evolución de la temperatura	40
5.5. Tiempo de ignición	40
6. Resultados Experimentales	42
6.1. Tiempos de ignición	42
6.2. Temperatura de ignición	44
6.3. Correlación de los resultados	46
7. Conclusiones y Comentarios	48
Bibliografía	50

Índice de Tablas

1.1. Catastro oficial de usos de suelos y recursos vegetacionales al 2024. B.N.: bosque nativo, P.F.: plantaciones forestales, P.E.G.: porcentaje de eucalyptus globulus de plantaciones forestales y B.M.: bosque mixto.	6
4.1. Las propiedades del combustible y los parámetros utilizados.	30
6.1. Flujo de calor crítico para la ignición y estimación de la temperatura promedio para los α probados.	45

Índice de Figuras

1.1. Causas de los incendios entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía (1985-2018) Fuente: Estadísticas de Incendios (CONAF) [1]	4
1.2. Número total de incendios y área quemada acumulada por grilla de 5x5 km (periodo 1985-2018) [1].	5
1.3. Eucalyptus Globulus.	7
1.4. Hoja de Eucalyptus Globulus	7
3.1. Incendio de Superficie.	15
3.2. Incendio de Subsuelo.	15
3.3. Incendio de Copa Activo.	15
3.4. Incendio de Copa Independiente.	15
4.1. Procedimiento experimental desde la obtención de la muestra (paso 1) hasta el cálculo de su densidad (paso 3).	29
4.2. "The Idealized-Firebrand Ignition test"(I-FIT). (1): Motor lineal, (2): Camara Basler, (3): Heater, (4): Termocuplas, (5): Piloto (Kanthal), (6): Radiometro, (7): Basket, (8): Data acquisition system, (9): Variac, (10): Fuente de poder.	32
4.3.	33
4.4. Basket con Eucalyptus.	33
4.5. Muestra en I-FIT	33
4.6. Preparación de la muestra.	34
4.7. Ignición de la muestra	35
6.1. Tiempos de ignición para $\alpha = 0,03$, $\alpha = 0,05$, and $\alpha = 0,07$. Las líneas continuas corresponden a los tiempos calculados por el modelo y las líneas verticales representan el flujo de calor crítico para cada α	42
6.2. Relación entre t_{ig}^{-1} y $\dot{q}_{inc}''$ para $\alpha = 0,03$, $\alpha = 0,05$, and $\alpha = 0,07$	43
6.3. Evolución teórica de la temperatura a lo largo del tiempo para los diferentes valores de α estudiados. Las líneas horizontales representan la temperatura crítica teórica en la que se espera que ocurra la ignición.	44
6.4. Comparación de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo entre la temperatura experimental y la teórica. Las líneas verticales discontinuas representan el tiempo crítico cuando se midió la ignición (rosado) y cuando se esperaba (azul).	45
6.5. Correlación de los datos experimentales utilizando la relación entre $\tau \cdot t_{ig}^{-1}$ and φ . La línea discontinua expresa una regresión lineal de los datos considerando todos los valores de α probados.	46

1 | Introducción y Antecedentes

1.1. Introducción

Los incendios forestales representan una amenaza significativa en Chile y en el mundo, siendo una consecuencia tangible del cambio climático. Se espera que este incremento del estrés abiótico en los bosques, afectando su capacidad para regenerarse, crecer y actuar como sumideros de carbono, lo que incrementa directamente los riesgos de incendios forestales. Existe una relación directa entre la sequía, el secado masivo de hojas y la caída de material vegetal en los bosques, lo cual aumenta el contenido de biomasa en el suelo forestal, incrementando así el potencial de incendios.

En Chile, uno de los eventos más recientes y significativos ocurrió en febrero de 2024, afectando a más de 9.000 hectáreas y provocando pérdidas considerables de vidas humanas, viviendas e infraestructura. Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), la mayoría de los incendios son causados por descuidos humanos y se intensifican bajo condiciones climáticas específicas, como altas temperaturas, baja humedad y vientos fuertes. La gestión de incendios en el país es un desafío que requiere estrategias efectivas para minimizar su impacto y adaptar las medidas de prevención según las características locales y climáticas.

Nuestro país tiene una extensión de más de 75 millones de hectáreas, las cuales alberga una gran diversidad de usos del suelo, que incluye áreas urbanas, agrícolas, praderas y en gran parte, bosques, los cuales ocupan aproximadamente el 24 % de la superficie total. Dentro de estos bosques se encuentran bosques nativos, plantaciones forestales y en menor medida, bosques mixtos, que incluyen diversas especies. Debido a la alta biodiversidad y a la heterogeneidad de combustibles presentes en los lechos forestales de Chile y de los bosques templados de América del Sur, es fundamental caracterizar y cuantificar los parámetros de combustión para diferentes tipos de lechos, especialmente en las zonas de interfaz urbano-forestal (WUI). El presente estudio se enfoca en analizar el comportamiento de ignición de *Eucalyptus globulus*, que ocupa más de un millón de hectáreas, representando el 35,9 % de las plantaciones forestales en el país y siendo la segunda especie más presente después del *Pinus radiata*.

Se evalúa el efecto de la fracción de volumen del combustible en la ignición del *Eucalyptus globulus*, el cual es relevante en este contexto, ya que produce pavesas efectivas y presenta una inflamabilidad intermedia en comparación con el pino, lo que genera preocupación debido a su impacto en la propagación de incendios en el territorio nacional.

Se realizaron mediciones para la recolección de datos utilizando el dispositivo I-FIT (Idealized-Firebrand Ignition Test), que permite una evaluación precisa del comportamiento de ignición de lechos de combustible expuestos a pavesas. La estructura cúbica y resistente al calor del I-FIT, protegida para evitar interferencias ambientales, utiliza un heater electrónico que simula la pavesa. Este dispositivo

permite evaluar el comportamiento de ignición de diferentes tipos de combustibles forestales, como las hojas de *Eucalyptus globulus*, asegurando la repetibilidad de los experimentos y permitiendo un ajuste preciso del flujo de calor deseado. De esta manera, se puede comprender mejor los procesos de propagación del fuego, midiendo los tiempos de ignición con precisión y simulando el efecto de una pavesa al caer sobre un lecho de combustible poroso.

Comparar los datos experimentales con un modelo teórico es fundamental para validar y mejorar la precisión de las predicciones en estudios científicos, especialmente en el contexto de incendios forestales. Por esta razón, en esta investigación se utilizó un modelo base empleado en estudios anteriores, realizando ciertas modificaciones de acuerdo a la especie en estudio y sus características. Aunque se emplean suposiciones y simplificaciones útiles, es necesario analizarlas para verificar si logran capturar toda la complejidad presente en condiciones reales.

En este estudio se investiga el comportamiento del *Eucalyptus globulus*, un combustible clave en los bosques chilenos, exponiéndolo a flujos de calor radiativo idealizados que simulan la energía de las pavesas. El objetivo principal es validar estos datos con el modelo teórico adaptado para la especie, determinando tiempos de ignición y la radiación crítica necesaria bajo diferentes fracciones de volumen, con el fin de ajustar el modelo y confirmar su precisión, contribuyendo así a una mejor comprensión y gestión de incendios forestales.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Incendios Forestales

El fuego ha sido un factor clave en la tierra durante cientos de millones de años y ha formado parte importante de la relación que tiene el ser humano con su entorno. A pesar de esto, el fuego es considerado como algo negativo y es necesario aprender a coexistir de manera más sostenible con él.

A lo largo de la historia, el fuego ha desempeñado un papel fundamental en los ecosistemas, pero el ser humano ha alterado los regímenes del fuego, lo que puede amenazar la sostenibilidad de estos [2]. Se puede ver reflejado en el cambio climático introducido por la actividad humana agregando incertidumbre, ya que puede cambiar la frecuencia debido a la sequías y causar efectos contradictorios en los ecosistemas.

La gestión de incendios es un desafío, ya que se debe equilibrar la reducción de riesgos para las poblaciones humanas con la sostenibilidad de la biodiversidad [2]. También se deben considerar las condiciones geográficas en donde se propaga el fuego debido a que no se comportará de la misma manera en lugares con diferentes cantidades de vegetación o topografía, esto puede ser clave en su conducta y propagación [3].

Existen diferentes tipos de incendios, aquellos que más destacan son los forestales que han ido aumentando su actividad debido al cambio climático y son la consecuencia más tangible de esto, debido a que se alargan las condiciones para que las temporadas de incendios sean más extensas y es probable que las condiciones se mantengan al tener climas más cálidos y secos, provocando un incremento en la inflamabilidad de los bosques. Por lo que la gestión de incendios y la necesidad de estrategias efectivas para tratar con incendios severos son un tema importante debido a que provoca pérdidas de vidas, ecosistemas, infraestructura, entre otros, por lo que es prioridad fortalecer en mejorar la percepción del riesgo a los incendios [4].

Dentro de los incendios forestales que han sido estudiados durante años debido al gran impacto que provocan en nuestras vidas se destaca uno de los eventos más importantes y recientes en el país fue en febrero del presente año, el cual afectó más de 9.000 hectáreas y ha sido considerado uno de los más grandes del país en los últimos 30 años.

1.2.2. Incendios Forestales en Chile

Chile continental, comprende una franja en la costa occidental del Cono Sur que se extiende entre los paralelos 17°29'57 S y 56°32'12 S, mayormente desde la ribera sudoriental del océano Pacífico hasta las cumbres más altas de la cordillera de los Andes. Alcanza un largo de 4.270 km, un ancho máximo de 445 km en los 52°21' S y un ancho mínimo de 90 km en los 31°37' S [5].

En Chile y en el mundo, los incendios forestales constituyen la causa más importante de destrucción de vegetación. Estos se incrementan y propagan con mayor facilidad cuando hay altas

temperaturas, fuertes vientos, sequedad de la vegetación y del ambiente. En un incendio forestal, además, se pueden perder viviendas, animales, fuentes de trabajo e incluso vidas humanas [6].

La época del año más peligrosa donde se desencadenan la mayor cantidad de incendios es en verano, debido que en Chile hay alrededor de 6 mil incendios forestales, que afectan una superficie equivalente a 50 mil hectáreas. A su vez, se le debe incorporar las condiciones climáticas idóneas para su propagación, las cuales corresponden al 30-30-30, siendo temperaturas superiores a 30°C, humedad inferior al 30 % y vientos con velocidades superiores a 30 km/hr [6].

Uno de los incendios más importantes y recientes ocurrió en febrero 2024 en la quinta región afectando a más de 9.000 hectáreas, aproximadamente 6.000 viviendas, donde fallecieron 123 personas y dejando daños en infraestructuras e industrias. Los factores más predominantes para la magnitud de este incendio fueron la baja humedad, altas temperaturas, el viento y la topografía debido a que se desarrolló en lugares con quebradas, barrancos y densa vegetación; por otro lado en las zonas urbanas se contaba con una alta densidad de edificación, falta de corta fuegos, déficit de accesibilidad a los focos de incendio y acumulación de combustible natural.

Los incendios forestales en la mayoría recaen en la acción humana, según la Corporación Nacional Forestal (CONAF) el 99 % se inicia por descuidos o negligencias humanas y la diferencia se genera producto de desastres naturales, por ejemplo un rayo. Cada periodo son alrededor de 52.000 hectáreas las superficies afectadas por estos, siendo la mayoría praderas y matorrales. Para poder hacer frente a estos episodios en Chile existen dos sistemas contra los incendios forestales, uno del sector privado y otra por parte del estado, además de la participación del cuerpo de bomberos [7].

Según lo indicado anteriormente, en la Figura 1.1 se representa la distribución de las causas de los incendios forestales para las regiones mayormente afectadas de nuestro país, evidenciando que el mayor factor que desencadena estos incendios son producto de manera accidental por el descuido de las personas, a excepción de la región del Biobío y Araucanía que los incendios intensionales son más frecuentes que los accidentales.

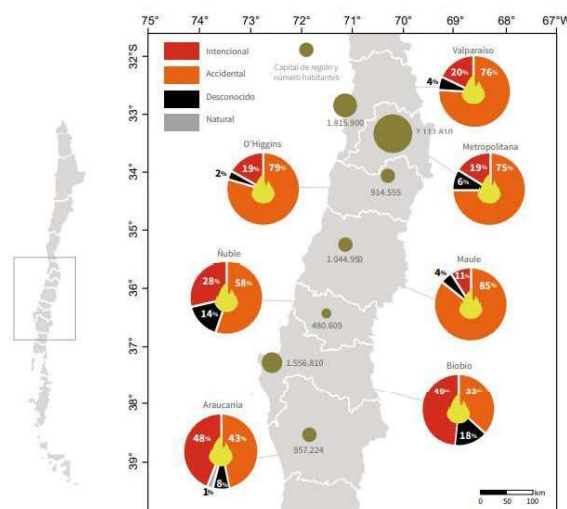


Figura 1.1: Causas de los incendios entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía (1985-2018) Fuente: Estadísticas de Incendios (CONAF) [1]

A continuación, en la Figura 1.2 se representa el impacto acumulado de los incendios que han afectado a Chile desde 1985 hasta 2018, siendo el sector mayormente afectado desde la extensión de la región de Valparaíso hasta la región de la Araucanía.

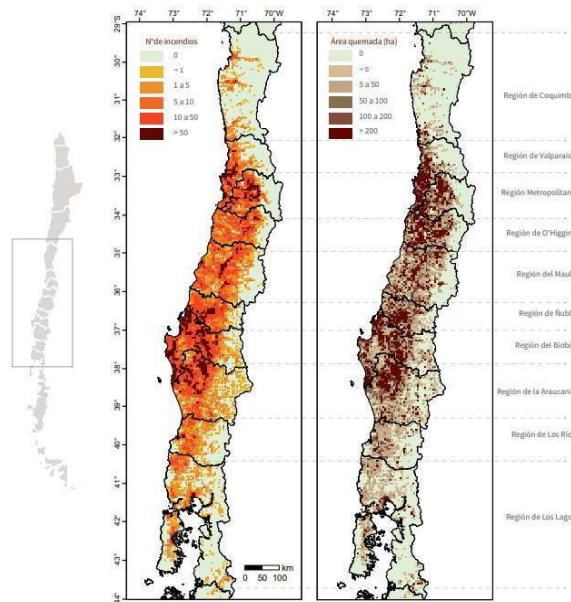


Figura 1.2: Número total de incendios y área quemada acumulada por grilla de 5x5 km (periodo 1985-2018) [1].

1.3. Vegetación nacional y especie: Eucalyptus Globulus

Chile continental tiene una superficie superior a 75 millones de hectáreas, dentro de los cuales el uso de suelo se distribuye en áreas urbanas e industriales, terrenos agrícolas, praderas, matorrales, bosques, humedales, áreas desprovistas de vegetación, nieves, glaciares y cuerpos de agua. Para efectos prácticos, se analiza el uso correspondiente a los bosques que corresponden al 24 % total de la superficie de Chile [8].

Según la información elaborada por la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF), nos entrega el catastro oficial de uso de suelos y recursos vegetacionales hasta el 2024, donde 18 millones de hectáreas (24 % correspondiente a territorio nacional) corresponden a superficie utilizada por bosques, de los cuales 14,7 millones de hectáreas (19,6 % correspondiente a territorio nacional) corresponden a bosques nativos, 3,2 millones de hectáreas (4,3 % correspondiente a territorio nacional) corresponden a plantaciones forestales y 0,2 millones de hectáreas (menos del 1 % correspondiente a territorio nacional) corresponden a bosques mixtos. Estos bosques mixtos corresponden a una mezcla de dos situaciones para ser catalogados dentro de este grupo, la primera situación consiste en una mezcla de bosque nativo adulto y especies plantadas en proporciones entre el 33 % y 66 % de cubrimiento, la segunda situación consiste en una mezcla de bosque nativo y especies exóticas que se han generado en forma natural en proporciones que fluctúan entre 25 % y 75 % de cubrimiento para cada una de las categorías que la constituyen [9].

La distribución de los tipos de bosques por región se encuentra expresados dentro de la Tabla 1.1, donde se puede apreciar la cantidad de hectáreas utilizadas por cada una de estas. A su vez, se entrega el porcentaje de utilización correspondiente a la especie en estudio *Eucalyptus Globulus*, con una ocupación un poco mayor a 1 millón de hectáreas (1,3 % correspondiente a territorio nacional) y su porcentaje con respecto a las plantaciones forestales distribuido por regiones. Dicha ocupación del *Eucalyptus Globulus* corresponde al 35,9 % del total de las plantaciones forestales, siendo esta la segunda especie con mayor presencia dentro del territorio nacional, donde es superada por la especie *Pinus radiata* con un 58 % de las plantaciones forestales dentro del territorio nacional.

Cabe destacar que el *Eucalytus globulus* no es una especie endémica del país, fue importada debido a que su plantación es de crecimiento rápido y es un medio para elevar la productividad de los suelos para satisfacer la demanda nacional e internacional de los productos derivados de las plantaciones forestales como la madera y la celulosa.

Tabla 1.1: Catastro oficial de usos de suelos y recursos vegetacionales al 2024. B.N.: bosque nativo, P.F.: plantaciones forestales, P.E.G.: porcentaje de eucalyptus globulus de plantaciones forestales y B.M.: bosque mixto.

Región	<i>B.N</i> (ha)	<i>P.F.</i> (ha)	<i>P.E.G</i> (%)	<i>B.M.</i> (ha)	Total
Arica y Parinacota	47.151,3	20,8	100 %	0,0	47.172,1
Tarapacá	33.246,4	29.264,2	0 %	0,0	62.510,6
Antofagasta	11.899,3	3.049,9	0 %	0,0	14.949,2
Atacama	3.224,2	276,4	98 %	0,0	3.500,6
Coquimbo	48.474,9	12.285,1	24 %	886,4	61.646,4
Valparaíso	413.765,3	76.601,6	78 %	1.184,6	491.551,5
Metropolitana	383.557,7	9.287,9	92 %	509,6	393.355,2
O'Higgins	428.775,9	159.310,2	41 %	2.152,6	590.238,7
Maule	581.515,3	634.893,5	11 %	28.674,8	1.245.083,6
Ñuble	247.979,8	380.714,9	26 %	17.051,8	645.746,5
Biobío	597.572,7	875.178,4	37 %	51.635,9	1.524.387,0
La Araucanía	1.045.619,2	652.645,7	53 %	43.123,6	1.741.388,5
Los Ríos	935.016,8	211.722,3	44 %	13.762,2	1.160.501,3
Los Lagos	2.791.761,5	98.361,8	72 %	12.407,4	2.902.530,7
Aysén	4.398.744,8	32.017,3	0 %	1.083,0	4.431.845,1
Magallanes	2.760.176,6	286,2	0 %	0,0	2.760.462,8
Total	14.728.482	3.175.916		172.472	18.076.870
Porcentaje Nacional	81.48 %	17.57 %		0.95 %	100.00 %



Figura 1.3: Eucalyptus Globulus.



Figura 1.4: Hoja de Eucalyptus Globulus

1.4. Motivación

El interés para realizar el estudio del *Eucalyptus globulus* y su impacto dentro de los incendios forestales en Chile se fundamenta en su amplia distribución dentro del territorio chileno, las implicaciones ecológicas y socioeconómicas que conlleva. Es la segunda especie forestal más ampliamente plantada en Chile, representa un porcentaje importante de las plantaciones forestales del país, sobre todo en los sectores de la zona centro y sur, aquellas regiones que son más propensas a incendios forestales intensos, de gran escala y grandes daños. Su estudio, manejo y análisis del comportamiento frente al fuego son los aspectos claves para tener la información necesaria para actuar de manera preventiva y proteger la biodiversidad, infraestructuras y comunidades que puedan encontrarse en áreas vulnerables.

La investigación es de suma importancia para entender el comportamiento de los incendios en las plantaciones del *Eucalyptus globulus*, esto se debe a que tiene características que facilitan la propagación de los incendios forestales como la alta inflamabilidad y la velocidad de propagación del fuego. Según estudios previos, se ha identificado que las hojas de esta especie contienen aceites esenciales y resinas que incrementan la intensidad del fuego, además presentan una alta tasa de crecimiento, lo que genera rápidamente una biomasa inflamable. Es por esto que comprender las condiciones que esta especie tiene al producirse la ignición y su comportamiento por la propagación del fuego es esencial para desarrollar estrategias preventivas en el manejo y prevención de los incendios.

A pesar que el *Eucalyptus globulus* no es una especie endémica de Chile, tiene un porcentaje importante dentro de las plantaciones forestales debido a su rápido crecimiento y valor comercial para la producción de madera y celulosa. Por lo que al ser afectadas las plantaciones por los incendios genera un impacto negativo dentro de la economía y medioambiente del país.

Estudiar el comportamiento de esta especie antes los incendios es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de manejo, prevención y mitigación de incendios, para proteger la biodiversidad y la economía del país. Por lo que esta investigación no solo contribuye a la seguridad y sostenibilidad de las áreas forestales en Chile, sino que también ofrece esquemas que pueden ser aplicables a nivel internacional en el contexto del manejo de otras especies forestales con alta inflamabilidad.

1.5. Alcance

El estudio tiene el enfoque en la determinación del tiempo estimado para la ignición de las hojas de *Eucalyptus globulus* utilizando un heater eléctrico como una representación idealizada del calor emitido por radiación de las brasas de fuego dentro de las partículas incandescentes (pavesas).

Este tipo de investigación es necesaria y relevante para poder entender de mejor manera el comportamiento de la ignición en los combustibles naturales forestales, para este caso particular en el *Eucalyptus*. De esta forma, determinar y prevenir sectores afectados donde se pueden encontrar esta especie, especialmente en áreas cercanas al interfaz urbano-forestal, donde el *Eucalyptus* se encuentra de manera más común. A su vez, se podrá controlar las variables analizadas en base a una parametrización de las características que vayan a analizarse.

Para poder realizar la determinación de las características del Eucalyptus se incluye tanto la parte experimental que considera el uso de la estructura del I-FIT para las pruebas de ignición, como la utilización de un modelo teórico basado en la ignición térmica adaptado en base a las muestras de Eucalyptus globulus de un sector determinado para poder realizar pruebas medibles y repetibles.

La investigación está delimitada a ciertas condiciones estandarizadas con diferentes escenarios que se pueden encontrar dentro de los bosques, los cuales son la naturaleza de las muestras, el sector afecto a la investigación, tiempo de exposición a la radiación de las hojas de Eucalyptus y la cantidad de calor que reciben las muestras hasta llegar al punto crítico para diferentes cantidades de volumen.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Estudiar el comportamiento de ignición del combustible compuesto por hojas de *Eucalyptus globulus*, representando el lecho de un bosque, el cual está expuesto a un flujo externo de calor radiativo idealizado, simulando la exposición de la energía proveniente de las pavesas, validando el modelo teórico adaptado para la especie en estudio.

1.6.2. Objetivos Específicos

1. Realizar pruebas experimentales para determinar los tiempos de ignición del combustible de la especie *Eucalyptus globulus*.
2. Determinar la radiación crítica a la cual tiene que estar expuesto el combustible para producir la ignición considerando las diferentes fracciones en volumen.
3. Comparar el modelo teórico con los resultados experimentales, así validar su precisión y determinar posibles ajustes.
4. Utilizar los parámetros contruidos a partir de la investigación para validar los supuestos establecidos y determinar si los resultados obtenidos confirman la precisión de dichos supuestos.

2 | Estado del Arte

Este estudio se centra en la investigación experimental y la modelación analítica del fenómeno de ignición causada por una partícula incandescente, la cual se llama pavesa y se encuentra irradiando sobre un estrato vegetal. Si bien existe una gran cantidad de especies que se puede investigar, para este caso en particular se realizará el estudio de la especie *Eucalyptus Globulus*. En la literatura se pueden encontrar investigaciones similares o relevantes para este trabajo.

Como es de esperar para este tipo de estudios, se pueden encontrar asociadas diversos tipos de especies. Dentro de los cuales existen investigaciones en específico de los bosques templados ubicados en América del Sur, donde se puede destacar la necesidad de conservar los bosques costeros de la Cordillera de la Costa debido a su alto endemismo, ya que a pesar de tener una mayor riqueza de especies y tener una historia biogeográfica más estable que los bosques de la cordillera de los Andes, estos han recibido menos protección en comparación con los bosques Andinos [10].

Históricamente, la mayoría de las áreas protegidas de América del Sur han sido designadas para preservar bosques por encima de los 600 m, principalmente en los Andes. Sin embargo, los bosques de la Cordillera de la Costa tienen una mayor riqueza de especies y están más amenazados que los bosques andinos en latitudes similares [10].

Debido al impacto humano a gran escala en el paisaje, el rango geográfico de los bosques templados del sur ha disminuido considerablemente durante el último siglo [10] entregando como resultado cambios en la biodiversidad, los cuales son consecuencia del calentamiento climático actual [11].

Las proyecciones del cambio climático incluyen un aumento en la actividad de los incendios y una mayor duración de la temporada debido a un deshielo más temprano y una tendencia general a la sequía producto al aumento de las temperaturas [7]. Donde uno de los principales factores que influye en la propagación del fuego es el viento, que proporciona oxígeno fresco al combustible y también altera la forma de la llama, lo que influye en el precalentamiento del combustible sin quemar [12].

Es probable que las condiciones más cálidas y secas aumenten la inflamabilidad del bosque, al menos inicialmente. Los cambios en el clima por sí solos tienen el potencial de alterar la distribución de los tipos de vegetación dentro de la región, y es probable que los cambios en la distribución de la vegetación provocados por el clima se aceleren cuando se combinan con incendios [7].

De esta forma, se puede observar en la literatura que existe un gran interés en el estudio de incendios de bosques para poder anticiparlos o prevenirlos, debido a que estos ayudan en la mitigación del cambio climático. Esto ha sido investigado anteriormente [13] en donde se determinó que actúan como sumideros naturales de carbono. Los principales factores que influyen en la estabilidad de los bosques son los incendios, sequías, agentes bióticos entre otros. A su vez, en este tipo de investigaciones busca proveer información científica para mejorar las políticas y maximizar la eficacia de los bosques como solución natural para el cambio climático [13]. Los factores más estudiados dentro de la literatura

son la sequía y las altas temperaturas en ciertas temporadas como se puede ver en un estudio que se realizó en los bosques de Europa Central [14], en donde se puede ver reflejado el estrés hídrico en distintos tipos de vegetaciones, lo cual provoca una disminución del potencial hídrico foliar, la decoloración, caída prematura de las hojas, como también muerte de millones de árboles debido a que la vegetación no es capaz de adaptarse tan rápidamente a las condiciones climáticas que se están generando. Es por esto la importancia de los bosques saludables y poner mayor énfasis en el monitoreo y entender los indicadores de pérdida de la salud forestal [15].

En otras investigaciones, también es posible ver como existen episodios llamados mega- incendios que son considerados de esta manera por la gran área que involucra, la dificultad de control y el daño que estos provocan [16]. Chile no es el único país que se ve afectado por estos eventos en la literatura, se pueden ver otros países afectados como Brasil, Portugal, Francia, Australia, Canadá, entre otros.

Estos tienen en común el desastre que ha dejado producto de dichos eventos, indicando que es crucial la implementación de medidas preventivas siendo de carácter urgente en la mayoría de estos. Para determinar y analizar los factores que gatillan estos acontecimientos existen estudios de pruebas desarrolladas con ignición espontánea, la cual fue realizada en una capa de combustible forestal por tizones idealizados. Estos se llevaron a cabo experimentalmente en un aparato a escala de banco diseñado para comprender la relación entre el tiempo de ignición y el flujo de calor radiativo incidente en una hojarasca de combustible forestal en forma de anillo. Entregando que, para los lechos de combustible considerados, se encontró que el inverso del tiempo de ignición depende linealmente del flujo de calor radiativo incidente, típicamente observado para combustibles sólidos térmicamente delgados. Sin embargo, el desafío principal es comprender cómo pueden encenderse estos tizones, crear nuevos focos de fuego sobre una capa de combustible forestal y cómo se propaga [4].

Por otro lado, la ignición piloteada tiene lugar con la presencia de una fuente de ignición, como una chispa o una llama, a diferencia de la ignición espontánea que ocurre sin ninguna fuente de ignición. Donde, algunos investigadores han realizado experimentos de autoencendido por encendido radiante, utilizando únicamente un flujo de calor externo [4]. Desafortunadamente, como se indicó anteriormente, solo se han realizado unos pocos estudios en ignición espontánea o piloteada donde las geometrías de la marca de fuego están completamente controladas [4]. La teoría para predecir la ignición de combustibles sólidos expuestos a flujos de calor radiante incidentes ha permitido obtener correlaciones simples del tiempo de retardo de la ignición con el flujo de calor incidente que son útiles en aplicaciones prácticas de ingeniería [2]. La ignición de los combustibles sólidos se controla mediante el calentamiento de la fase sólida. La comunidad científica de seguridad contra incendios ha prestado considerable atención a este tema, desarrollando modelos teóricos basados en la difusión de calor en el sólido por conducción y respaldados por una gran cantidad de evidencia experimental [2] [4].

Se deben utilizar datos de ignición piloteada para evaluar dos propiedades de inflamabilidad clave, los cuales son el calor incidente y el flujo de calor crítico para un material dado. Aunque son muy comunes, las pruebas de ignición piloteada no están instrumentadas para tener en cuenta los efectos de flujo, los efectos de radiación en profundidad y las ambigüedades que resultan de las características espectrales de emisión del material y la fuente de flujo de calor [3]. Se derivan fórmulas de tiempo para alcanzar la temperatura de ignición en función del flujo de calor incidente y los diversos parámetros

termofísicos del material para combustibles sólidos térmicamente espesos, térmicamente delgados y térmicamente intermedios [17].

Existen muchas teorías establecidas para los criterios de ignición, como el flujo de masa crítica, que es físicamente constante, o la intensidad crítica para la ignición, la temperatura de ignición, el producto de tiempo de flujo y humedad relativa del cuerpo estudiado [18].

Para efectos prácticos, el estudio realizado contribuirá de manera significativa al entendimiento de la generación de los incendios. Esto se debe a que los experimentos realizados corresponden a la especie *Eucalyptus Globulus*. Si bien no es una especie endémica, se encuentra de manera significativa dentro de los bosques chilenos. Para el desarrollo de la investigación se busca determinar la relación entre el calor incidente y el tiempo de exposición para diferentes niveles de porosidad mediante el uso del I-FIT.

3 | Marco Teórico

3.1. Incendios Forestales

3.1.1. Clasificación de Incendios Forestales

Los incendios forestales son sumamente variables, existiendo diversas clasificaciones, de acuerdo con la morfología, el grado de intensidad o el patrón de comportamiento. En el mundo forestal se han distinguido tres tipos de incendios en función de los estratos de combustibles alcanzados que tienen como consecuencia diferentes grados de impacto en los ecosistemas [19]:

1. Incendios de superficie.
2. Incendios de subsuelo.
3. Incendios de copas.

3.1.2. Incendios de superficie

Se denomina incendios de superficie a aquellos en que el fuego consume los combustibles vivos y muertos que se encuentran a nivel del suelo como hierbas, plantas, ramas, y sin considerar el cuerpo de los árboles. Dadas las características de estos combustibles, que arden con facilidad, los incendios de superficie son los más frecuentes y, en consecuencia, los más estudiados.

3.1.3. Incendios de subsuelo

Este tipo de incendio se inicia a raíz de los siniestros convencionales, afectando a la materia orgánica acumulada, siendo de lenta propagación, pero peligrosa. Afectan a un determinado tipo de suelo, de origen glaciario o volcánico, presente en pocas partes del mundo. Cabe mencionar que es posible que sean detectados solo por la emisión de humo, ya que normalmente queman sin llama y avanzan lentamente debido a la insuficiencia de oxígeno, pudiendo mantenerse incluso con contenidos altos de humedad durante días o semanas. Estos incendios son poco frecuentes.

3.1.4. Incendios de copa

Se caracterizan por incorporar en mayor o menor grado la combustión de las copas de los árboles. Son, además, los que presentan mayor dificultad para la extinción y graves efectos sobre la biomasa. Se subdividen en tres categorías: pasivos, activos e independientes.

En los incendios de copas pasivos, las hojas, ramas y troncos se encienden de manera intermitente debido al calor procedente de la cercanía de un incendio que se desarrolla en el sotobosque. Este fenómeno es también denominado incendio de copas discontinuo o incendio de antorcha y es frecuente en zonas de pinos o matorrales densos.

Los incendios de copas activos se caracterizan por la combustión que tiene lugar al mismo tiempo en el material combustible superficial en las copas de los árboles, en los que, además, el calor de las llamas proviene de incendios de superficie que proporcionan energía suficiente para sostenerlo y propagarlo por las copas.

En los incendios de copas independientes su frente avanza rápidamente por las copas, con independencia de la posible presencia de un incendio de superficie. Este tipo de incendio es muy peligroso, pero poco frecuente, sin embargo, los incendios de superficie, de subsuelo y de copas pueden suceder de manera conjunta o en una combinación entre ellos, variando frecuentemente el régimen del incendio de acuerdo con los múltiples factores que afectan al fenómeno [20].



Figura 3.1: Incendio de Superficie.



Figura 3.2: Incendio de Subsuelo.



Figura 3.3: Incendio de Copa Activo.



Figura 3.4: Incendio de Copa Independiente.

3.1.5. Mecanismos de Propagación

3.1.5.1. Propagación Superficial

Es uno de los mecanismos más comunes en los incendios forestales. Desde el punto de vista físico, el modelo mayormente aceptado es el de Fons [21]. Este modelo establece que es necesario suficiente

calor en el frente del fuego para provocar la ignición del material combustible adyacente.

La unidad de combustible en combustión actúa como fuente de calor para las unidades de combustible adyacentes, donde éstas reciben el calor. La velocidad de propagación depende de la rapidez en que se encienden las unidades adyacentes. En los incendios superficiales se queman principalmente materiales orgánicos de la superficie, como hojas en descomposición, madera, corteza y vegetación baja.

3.1.5.2. Propagación en Copas

Un incendio de copa ocurre cuando el fuego se propaga desde el suelo hasta las copas de los árboles. Este tipo de incendio pasa por tres fases. La primera fase se conoce como incendio de copas pasivo, que comienza con un incendio superficial que enciende solo algunos árboles cercanos, en segunda fase, si el fuego se propaga simultáneamente a través de copas y la superficie, se denomina incendio de copas activo, finalmente si un incendio de copas se propaga a gran distancia o sin la presencia de un incendio superficial se llama incendio de copas independiente.

3.1.5.3. Propagación por Spotting

Es un tipo de propagación, donde los árboles se encienden durante cualquier fase de un incendio de copa, así como los árboles muertos que se encienden en cualquier tipo de incendio, actúan como fuentes de pavesas que podrían generar incendios por spotting. Las pavesas son pequeños trozos de madera o material carbonizados, desprendidos generalmente de la vegetación en llamas, son transportados por los fuertes vientos a través del aire alcanzando otros puntos del terreno, provocando nuevos focos de incendios.

La propagación de un incendio aumenta drásticamente cuando se producen numerosos focos de incendios que se encienden más allá de la fuente de fuego. La probabilidad de ignición con las pavesas, depende de las características del árbol fuente y de sus pavesas, debido a que si estas son grandes no alcanzan puntos altos y pueden generar focos de incendio al tocar el suelo. Por otro lado, si las pavesas son pequeñas, suelen apagarse antes de llegar al suelo. Existen características relevantes que influyen en la probabilidad de provocar nuevos incendios y estos son su tamaño, forma, densidad y la altura desde donde son lanzadas.

3.2. Caracterización de la Biomasa

Antes de comenzar a realizar las pruebas es importante la caracterización de la biomasa a utilizar para poder entender su comportamiento. Dentro de los conceptos más importantes que se deben entender se encuentran los siguientes:

3.2.1. Densidad de Masa

Este concepto se refiere a la densidad unitaria de la biomasa, en donde se considera la masa de la partícula en seco ((0%) de contenido de humedad) por unidad de volumen [22].

$$\rho = \frac{m_{fuel}}{v_{fuel}} \quad (3.1)$$

Para medir el volumen, en este caso se utilizará la metodología en donde se debe sumergir la partícula en algún líquido y observar el cambio de volumen medido, para este caso se requiere que la hoja se encuentre seca en el horno y tener el conocimiento de su masa antes de realizar la prueba. Se debe tener en consideración que para utilizar este método la partícula no debe absorber el líquido que es utilizado [22].

3.2.2. Densidad Aparente

La densidad aparente (ρ_b) es la masa del combustible dividido por el volumen del espacio en donde se encuentra [23].

$$\rho_b = \frac{m_{fuel}}{v_{basket}} \quad (3.2)$$

La diferencia con la densidad de la masa es que este concepto incluye todo el espacio en donde se encuentra, considerando los espacios con aire que se encuentran entre el combustible, en donde se toma que la masa del aire al interior del combustible es despreciable. Este es un término muy utilizado en distintos temas relacionados a los incendios, debido a que materiales con una menor densidad aparente tienden a producir fuegos más intensos, pero de corta duración, mientras que estratos con mayor densidad aparente serán quemados más lentamente siendo un suministro de combustible constante y generando que el fuego sea más prologado.

3.2.3. Packing Ratio

El packing ratio (β), es una medida usada para representar la compactación del estrato vegetal, el cual se calcula como la división entre la densidad aparente y la densidad de la masa [23].

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_{fuel}} \quad (3.3)$$

Es una medida de gran interés debido al comportamiento y la información que nos puede entregar, cuando el packing ratios es un valor bajo se debe a la gran cantidad de espacios con aire, facilitando la entrada de oxígeno, aumentando la probabilidad de ignición y propagación, en cambio, cuando se encuentran valores elevados de packing ratios se puede observar que la penetración del calor es más

baja, lo que lleva a una menor propagación, pero si se produce la ignición es una fuente más constante y duradera [23].

3.2.4. Porosidad

La porosidad (ϵ) se define como la razón entre el volumen del espacio ocupado por el aire con respecto al volumen total del estrato vegetal [23].

$$\epsilon = \frac{v_{aire}}{v_{basket}} \quad (3.4)$$

También es un índice muy importante en el estudio de los incendios y también estudia la compactación del estrato vegetal. Se puede observar que a un mayor índice de porosidad, permite una mayor circulación de aire a través del estrato vegetal, lo cual facilita la propagación del fuego e intensifica las llamas, en cambio los estratos con baja porosidad pueden limitar la entrada de aire actuando como barrera y reducir la velocidad de propagación del fuego.

3.2.5. Fracción en volumen

La fracción en volumen (α_{fuel}) es otro factor utilizado para representar la compactación del estrato vegetal, el cual es la razón entre el volumen del material y el volumen total en donde se encuentra el estrato [23].

$$\alpha_{fuel} = \frac{v_{fuel}}{v_{basket}} \quad (3.5)$$

Mientras mayor es la proporción del estrato vegetal, facilita la ignición y genera una combustión más intensa debido a que existe mayor combustible disponible. Por otro lado, a menor valor existe mayor espacio vacío lo cual facilita la circulación de aire para la ignición, pero se generará una combustión menos intensa [23].

3.2.6. Relación Superficie–Volumen

La relación superficie– Volumen (ω) se define con el área de una partícula unitaria dividida por su volumen [23].

Esta razón tiene una gran importancia en el comportamiento de las partículas. Se puede ver que, a medida que una partícula disminuye su tamaño, su relación superficie– volumen aumenta. Esto significa que para partículas más pequeñas hay mayor superficie disponible por unidad de volumen, esta información es muy relevante para el análisis de incendio debido a que hojas secas o astillas de madera tienden a encender más rápidamente que los que tienen una baja relación como troncos o bloques grandes de madera, debido a que una mayor área superficial es expuesta al oxígeno, facilitando la ignición.

Por otro lado, es importante mencionar que es una medida muy difícil de calcular debido a que la mayoría de estratos vegetales no tienen una forma geométrica estándar, cambiando de forma constantemente debido a las diferentes condiciones expuestas, como humedad, temperatura, entre otros, generando una alta variabilidad en los resultados [23].

3.3. Mecanismos de Transferencia de Calor

3.3.1. Conducción

La conducción de calor se define como la transferencia de energía desde las partículas con mas energía de un medio a las adyacentes con menor energía [24]. La conducción se puede producir en sólidos, líquidos y gaseosos. Lo que fuerza esta transferencia es la diferencia de temperatura, mientras más alta es la diferencia, mayor es la tasa de transferencia de calor.

En los líquidos y gases, se produce a través de colisiones y a la difusión de las moléculas durante el movimiento aleatorio, cuando estas colisiones ocurren, las moléculas de mayor energía transfieren parte de su energía a las moléculas con menor energía, propagando de esta manera el calor.

En cambio, los sólidos tienen una estructura fija y ordenada y su densidad de partículas es mayor que en los líquidos y gases por lo que facilita la transferencia de energía. La conducción se realiza por las vibraciones de sus partículas, cuando se calientan, ganan energía térmica y empiezan a vibrar, esta vibración se transmite de partícula en partícula, propagando el calor a través del material. En algunos sólidos como los metales, el calor también es transportado por medio de los electrones libres [24].

La tasa de transferencia de calor de un material está afectada por la forma geométrica, el grosor y tiempo de materia, además de la variación de temperatura a través del mismo. En términos diferenciales se tiene:

$$\dot{q}_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \text{ (W)} \quad (3.6)$$

La constante de proporcionalidad k , nos indica la conductividad térmica del material y nos indica la capacidad del material para conducir en calor. Por otro lado, $\partial T / \partial x$ es la gradiente de temperatura al interior del material y A representa el área de la sección transversal que es normal a la transferencia de calor. Esta ecuación se denomina Ley de Fourier de la conducción de Calor [24].

3.3.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento, involucrando efectos de conducción y movimiento de fluidos. Mientras mayor es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. Si no existe movimiento masivo del fluido, la transferencia de calor ocurrirá mediante pura conducción. Sin

embargo, si el movimiento del flujo es masivo, complicará la determinación de las tasas de transferencia de calor [24].

Para la convección tenemos dos tipos, la forzada y la natural. En el caso de la forzada es cuando el movimiento del fluido alrededor del objeto se provoca usando un instrumento externo como un ventilador, bomba o viento, lo que ayuda a mover el calor desde la superficie del objeto hacia el fluido. En cambio, la convección natural, el movimiento del fluido es debido a las fuerzas que son inducida por la diferencia de densidad debido a una gradiente de temperatura al interior de este.

Se ha observado que la tasa de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, esta relación se describe mediante la ley de enfriamiento de Newton [24]:

$$\dot{q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)(W) \quad (3.7)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/(m^2 K)$. Este coeficiente no es una propiedad del fluido, sino es un parámetro determinado de manera experimental. A_s es el área de la superficie a través de la cual ocurre la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de superficie, T_∞ es la temperatura del fluido lejos de la superficie [24].

3.3.3. Radiación

La radiación es la energía que emiten los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), debido al cambio en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere de la presencia de un medio. La transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío [24].

En estudios de transferencia de calor, interesa la radiación térmica, debido a que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura sobre el cero absoluto emiten radiación térmica. La radiación es un fenómeno volumétrico, esto significa que involucra el volumen completo de los materiales, sólidos, líquidos y gases pueden emitir, absorber o transferir radiación. Sin embargo hay materiales como los metales, la madera y las rocas que son opacos a la radiación térmica. Cualquier radiación generada por las regiones internas de estos materiales opacos no pueden escapar hacia a superficie y cualquier radiación que golpee estos materiales es absorbida muy cerca de la superficie.

La tasa máxima de radiación que puede emitir desde una superficie a una temperatura T_s (K) es expresada por la Ley de Stefan–Boltzmann como:

$$\dot{q}_{r,bb} = \sigma A_s T_s^4 (W) \quad (3.8)$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ se denomina constante de Stefan–Boltzmann. La superficie

idealizada que emite radiación a esta tasa máxima se denomina cuerpo negro. Cabe destacar que la radiación emitida por superficies reales siempre es inferior a la de un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \text{ (W)} \quad (3.9)$$

En donde podemos observar que ε es la emisividad de la superficie, cuyo valor está en el rango de 0 a 1, donde este valor nos muestra que tanto se asemeja a un cuerpo negro. Otra propiedad importante de la radiación en una superficie es su absorción, que es la fracción de energía radiante incidente en una superficie que es absorbida por ella, también toma valores entre 0 y 1, donde un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él [24].

En general, tanto la emisividad con la absorción depende de la temperatura y la longitud de onda de la radiación. La ley de radiación de Kirchhoff dice que la emisividad y la absorción de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales.

La diferencia entre la tasa de radiación emitida por la superficie y la tasa absorbida es la razón neta de transferencia de calor. En general, determinar la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre dos cuerpos es complicado, debido a que depende de las propiedades de la superficie, su orientación y la interacción del medio [24].

3.4. Teoría de la Ignición de Sólidos

La ignición es el proceso por el cual un material combustible se enciende cuando se expone a una fuente de calor. Este proceso se genera cuando un material combustible se calienta hasta alcanzar temperaturas que producen una rápida reacción exotérmica de oxidación, que es conocida como combustión. En general, la ignición casi siempre necesita el aporte de calor de una fuente externa. La cantidad de calor y temperatura necesaria para alcanzarla depende de las propiedades del combustible, su tamaño y forma, además del tiempo de exposición que se encuentre expuesto a la fuente de calor.

Los potenciales combustibles para la ignición se dividen en sólidos, líquidos y gases, pero la mayor parte de los que contribuyen a incendios forestales son sólidos. En el caso de los materiales sólidos, que se encuentran inicialmente a temperatura ambiente y se exponen a una fuente de energía externa, en consecuencia, la temperatura de la superficie que recibe el calor comienza a elevarse. Este instante se considera el comienzo del proceso de ignición. A partir de ese instante, comienzan a suceder una serie de fenómenos físicos y químicos a medida que la energía llega a la superficie del material.

Como se mencionó anteriormente, la combustión en la superficie de un sólido involucra diversos procesos químicos y físicos. Es importante mencionar que para que ocurra la ignición, estos primero deben gasificarse. Este proceso comienza debido a que el sólido es calentado a través de una fuente de calor externa $\dot{q}_{inc}''$.

La gasificación de materiales sólidos generalmente implica la descomposición de moléculas complejas en moléculas más simples, este proceso es llamado pirólisis. En este proceso es donde producen estos cambios físicos y químicos en los materiales sólidos. A medida que la tasa a la cual se produce la gasificación por la exposición al calor se incrementa, aparecerá una concentración de gases inflamables cerca de la superficie. La rapidez con la que se produce la pirólisis depende fuertemente de la temperatura de la superficie del sólido.

Para que se forme una mezcla inflamable con el aire, los gases combustibles deben liberarse rápidamente desde la superficie del sólido, este proceso es llamado difusión. Como las corrientes convectivas generadas por el calentamiento o alguna fuerza externa, retiran constantemente los vapores de la superficie, es necesario que sean reemplazados continuamente por otros vapores para mantener una mezcla con el aire que sea capaz de encender [25]. El proceso de ignición puede iniciarse principalmente de dos formas, ignición pilotada e ignición espontánea.

3.4.1. Ignición Pilotada

Este tipo de ignición se produce cuando un material combustible se enciende en presencia de una fuente de ignición externa como una llama, chispa o un alambre caliente, en donde se encuentra una región a mayor temperatura y permite iniciar la reacción de combustión. El material debe calentarse hasta una temperatura suficiente para que los gases generados se mezclen con el aire y se inflamen cuando entran en contacto con la fuente de ignición.

Cuando ocurre la ignición, la llama se propaga por las zonas donde hay mezcla inflamable, consumiendo los reactantes. La tasa de pirólisis en el momento en que aparece la llama determina si esta puede mantenerse o si la reacción de combustión cesará después de que la mezcla inflamable se haya consumido. El calor que es liberado por la llama aumentará la tasa de pirólisis y, si no es suficiente para mantenerla, se extinguirá. El proceso de pirólisis puede continuar hasta generar nuevamente la mezcla inflamable, lo que provoca nuevamente la ignición. Este fenómeno se manifiesta como una serie de destellos que preceden a la ocurrencia de una llama sostenida. La aparición del primer destello se denomina flash point y se da a la temperatura T_{flash} y la aparición de la llama sostenida se denomina fire point [23].

3.4.2. Ignición Espontánea

Cuando hablamos de ignición espontánea, nos referimos a que no requiere de una fuente de ignición externa. Sucede cuando el material se calienta hasta el punto donde los vapores de combustible generados se encienden espontáneamente debido a la alta temperatura alcanzada.

La ignición espontánea tiene características distintas a la ignición pilotada, debido a que, una vez formada la mezcla inflamable, es necesario aumentar su temperatura hasta que ocurra la reacción de combustión. En este tipo de ignición es común hablar de dos tiempos, el tiempo de pirólisis y el tiempo de inducción. El tiempo de pirólisis es el periodo desde el inicio del calentamiento del sólido hasta la producción de una mezcla inflamable. El tiempo de inducción es el período que tarda a mezcla

inflamable en alcanzar la temperatura de ignición. En un proceso de ignición espontánea no hay un piloto que actúe como punto de inicio para la reacción, por lo que la mezcla inflamable debe absorber la suficiente energía para encenderse [26].

3.4.3. Términos a considerar en la Ignición

3.4.3.1. Charring

Luego de conocer el proceso de pirólisis, es importante conocer que existen características importantes en los sólidos a considerar, como indicar si el material es capaz de formar material carbonizado (char en ingles) en la superficie del sólido, este proceso es llamado charring [25]. Esta capa de material carbonizado reduce la tasa de transferencia de calor hacia el interior del material en donde se produce la pirólisis, disminuyendo esta tasa en el tiempo. Esto se debe a las propiedades aislantes de la capa del char y a la re-radicación.

Este proceso es importante en la pirólisis, debido a que la capacidad de un material para formar una capa de char puede determinar su comportamiento frente al calor y la resistencia frente al fuego, pudiendo aplicar medidas de seguridad en contra de los incendios.

3.4.3.2. Flujo crítico de Ignición $\dot{q}_{inc,cri}''$

El flujo crítico de un material sólido es el mínimo flujo externo de calor necesario para generar suficientes gases de pirólisis en su superficie, permitiendo la ignición del material [25]. Existen flujos críticos tanto para la ignición piloteada como para la espontánea y, como es de esperar, los flujos críticos de ignición piloteada tienden a ser menores que los de ignición espontánea. Conocer el flujo crítico de ignición de materiales es de suma importancia para la prevención de incendios y el diseño de medidas de seguridad.

3.4.3.3. Temperatura T_{ig} y Tiempo de Ignición t_{ig}

Se asume que el sólido permanece inerte hasta su ignición y que la fase gaseosa se puede simplificar mediante un coeficiente de transferencia de calor total, esto es equivalente a suponer que el proceso que se sucede hasta alcanzar la ignición puede ser caracterizado simplemente obteniendo una temperatura característica de la superficie, comúnmente conocida como T_{ig} . De manera similar, si un sólido se expone a una fuente externa de calor en el tiempo cero, el tiempo que transcurre hasta que se produce la ignición se conoce como t_{ig} [26].

La condición crítica de ignición puede determinarse mediante un análisis simple. Si el tiempo para alcanzar la ignición t_{ig} , es infinitamente largo, no habrá gradientes de temperatura en el interior del sólido y las pérdidas de calor a través de la superficie serán iguales al calor recibido externamente. Este flujo se conoce como flujo crítico $\dot{q}_{inc,cri}''$ y representa el mínimo necesario que debe aplicarse a la superficie para alcanzar T_{ig} y, por lo tanto, provocar la ignición del sólido [26].

Es importante señalar que tanto el flujo crítico de ignición como la temperatura de ignición no son propiedades inherentes del sólido. Estos parámetros resultan de la interacción entre el material y las condiciones ambientales de los experimentos [26].

El comprender los factores que influyen es fundamental para poder desarrollar estrategias más efectivas para la prevención de incendios. Algunos de ellos son densidad, porosidad, humedad del aire, intensidad del flujo de calor, forma y tamaño del sólido, entre otros.

3.4.4. Aproximación Thermally Thin

En esta sección se muestra parte de las consideraciones utilizadas para materiales thermally thin y se basa en los desarrollos presentados con anterioridad [27]. La aproximación asume que el gradiente de temperatura dentro del sólido combustible es despreciable, lo que significa que su temperatura es constante en todo su volumen. Desarrollar la distribución de temperatura del sólido $T(t)$ basándose en esta suposición permite encontrar una relación clásica entre t_{ig} y $\dot{q}_{inc,cri}''$. La teoría de ignición de sólidos thermally thin es directa y se aplica a un material de espesor d , aislado en uno de sus lados. Las condiciones de borde para este caso son las siguientes:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} x = 0 = \dot{q}_{inc}'' \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} x = d = 0 \quad (3.11)$$

Bajo la aproximación thermally thin, $T(x, t) \approx T(t)$. Realizando un análisis de conservación de la energía en un volumen de control que rodea al material, se obtiene que:

$$\rho C_p d \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{inc}'' - h_{conv}(T - T_\infty) - \varepsilon(T^4 - T_\infty^4) \quad (3.12)$$

El flujo de calor neto incluye la pérdida por radiación y la ganancia de calor desde el ambiente a temperatura T_∞ . Debido al término T^4 , no es posible obtener una solución analítica directa. Para superar este inconveniente, el término de pérdida por radiación se linealiza mediante series de Taylor en torno a T_∞ , utilizando un coeficiente efectivo total h_r .

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)}{T - T_\infty} \approx 4\varepsilon \sigma T_\infty^3$$

Considerando que $h_T = h_{conv} + h_r$, se tiene que:

$$\rho C_p d \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{inc}'' - h_T(T - T_\infty)$$

Es de interés resolver la distribución de temperatura $T(t)$, para ello se realizan los siguientes cambios de variable:

$$\theta = \frac{h_T(T - T_\infty)}{\dot{q}_{inc}''}, \quad \tau = \frac{h_T t}{\rho C_p d}$$

Se tiene que el problema puede ser reescrito en las nuevas variables como:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = 1 - \theta, \quad \theta(0) = 0$$

Cuyo resultado, al regresar a las variables originales del problema, es:

$$T(t) = T_\infty + \frac{\dot{q}_{inc}''}{h_T} \left[1 - \exp\left(-\frac{h_T t}{\rho C_p d}\right) \right] \quad (3.13)$$

Si se consideran tiempos de ignición relativamente cortos, se encuentra que $1 - e^{-\tau} \approx \tau$. Este resultado se obtiene mediante una expansión en series de Taylor en torno a $\tau = 0$. Esto permite tener una relación simple para el tiempo de ignición, t_{ig} , que se alcanza cuando $T = T_{ig}$. Este desarrollo de Taylor se reemplaza en la Ecuación 3.13.

$$t_{ig} \approx \frac{\rho C_p d (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}_{inc}''} \quad (3.14)$$

La Ecuación 3.14 permite suponer, con base en el supuesto de thermally thin, que t_{ig} se relaciona inversamente con la radiación incidente, $\dot{q}_{inc}''$, al menos para tiempos cortos.

3.4.5. Aproximación Thermally Thick

Esta parte describe algunas de las consideraciones aplicadas a materiales térmicamente gruesos, basándose principalmente en los desarrollos mencionados con anterioridad [27]. El análisis de la distribución de temperatura del sólido $T(x, t)$ permitirá establecer una relación clásica entre t_{ig} y $\dot{q}_{inc}''$. La teoría se desarrolla para un medio semi-infinito (térmicamente grueso) con temperatura constante en la superficie. Posteriormente, esta condición de borde se ampliará para cubrir el caso de condición de borde de flujo y se comparará con los resultados de materiales térmicamente delgados. El problema se replanteará como un modelo de conducción según la siguiente equivalencia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.15)$$

En este caso, a diferencia de thermally thin, existe un gradiente de temperatura no nulo al interior del sólido, requiriendo de dos condiciones de borde.

$$\begin{aligned} x = 0, & \quad T = T_S \\ x \rightarrow \infty, & \quad T = T_\infty \end{aligned}$$

Por otro lado, la condición inicial de este problema corresponde a:

$$t = 0, \quad T = T_\infty$$

Es relevante determinar la distribución de temperatura $T(x, t)$. Se investiga una solución de la forma:

$$\frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty} = \theta(\eta)$$

donde $\eta = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}$. Al reemplazar, es posible demostrar que:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (T_s - T_\infty) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \left(-\frac{\eta}{2t} \right)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (T_s - T_\infty) \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \left(\frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \right)^2$$

Reemplazando en la Ecuación 3.15 se convierte en:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + 2\eta \frac{d\theta}{d\eta} = 0 \quad (3.16)$$

Las condiciones de borde se convierten en:

$$\begin{aligned} \eta = 0, \quad \theta &= 1 \\ \eta = \infty, \quad \theta &= 0 \end{aligned}$$

Realizando nuevamente un cambio de variable $\psi = \frac{d\theta}{d\eta}$ la Ecuación 3.16 queda:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{d\eta} &= -2\eta\psi \\ \ln \psi &= -\eta^2 + c_1 \\ \psi &= c_2 e^{-\eta^2} \end{aligned}$$

Al integrar la expresión desde 0 a η , se obtiene:

$$\begin{aligned} \theta(\eta) - \theta(0) &= c_2 \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta \\ \theta(\eta) &= 1 + c_2 \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta \end{aligned}$$

Al considerar la condición de borde $\eta \rightarrow \infty, \theta = 0$, se tiene que:

$$\begin{aligned}
c_2 &= -\frac{1}{\int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta} \\
&= -\frac{1}{\text{erf}(\infty)}
\end{aligned}$$

Se obtiene que $c_2 = -2/\sqrt{\pi}$. La solución en las variables θ y η corresponde a:

$$\theta(\eta) = 1 - \text{erf}(\eta)$$

Volviendo a las variables originales del problema:

$$T(x, t) = T_\infty + (T_s - T_\infty) \left(1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right) \quad (3.17)$$

La condición de borde en $x = 0$ puede quedar:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \dot{q}_{inc}'' - h_T(T - T_\infty)$$

Si la Ecuación 3.15 se resuelve con esta condición de borde, manteniendo las condiciones anteriormente planteadas, la solución, luego de evaluarse en $x = 0$ donde la temperatura de la superficie, T_s , se tiene:

$$\frac{h_T(T_s - T_\infty)}{\dot{q}_{inc}''} = 1 - \exp \left(\frac{h_T^2 t}{K \rho C_p} \right) \text{erfc} \left(\frac{h_T \sqrt{t}}{\sqrt{k \rho C_p}} \right) \quad (3.18)$$

Es lógico suponer que la temperatura de ignición se alcanzará primero en la superficie del sólido, por lo tanto, $T_s = T_{ig}$. Nuevamente, como se hizo para thermally thin se busca una relación simple para t_{ig} , considerando tiempos de ignición cortos. Utilizando una expansión en series y truncando los resultados, se obtiene que:

$$t_{ig} \approx \frac{\pi}{4} k \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_\infty}{\dot{q}_{inc}''} \right)^2 \quad (3.19)$$

La Ecuación 3.19 permite suponer, basándose en el supuesto thermally thick, que los tiempos de ignición t_{ig} se relacionan en forma inversa al cuadrado de la radiación incidente, $\dot{q}_{inc}''$, al menos para tiempos cortos.

4 | Metodología Experimental

4.1. Descripción general

Para realizar las pruebas experimentales, se estableció un único lugar donde recoger muestras, de esta manera estandarizar las pruebas para que fueran repetibles, por lo que se estableció un bosque de *Eucalyptus globulus*, el cual se encuentra ubicado en el área de Curauma, a las afueras de la ciudad de Valparaíso, quinta región, zona central de Chile.

4.2. Selección y recolección de la muestra

Para poder realizar las pruebas lo más representativas dentro de lo que se encuentra en un bosque, se realizó un estudio para considerar una fracción de volumen lo más real posible. Es por esto que se utilizó un marco de $0,5 \times 0,5$ [m], el cual fue ubicado en tres lugares diferentes del lecho forestal y así con la muestra que se encontraba en esta superficie poder estimar la densidad de la masa (ρ) en el lecho del bosque. En esas 3 ubicaciones se midió la profundidad de las hojas que se encontraban, para luego recoger todo lo que se encontraba en esa misma región, guardando las hojas en una bolsa por separado de cada muestra y etiquetando cada una de estas para poder reconocer el lugar de la toma de muestras. Estas bolsas fueron llevadas al laboratorio para poder realizar los diferentes cálculos que se necesitaban como, el volumen de la muestra con el dato de la profundidad recogido en terreno, densidad, fracción de volumen, entre otros.

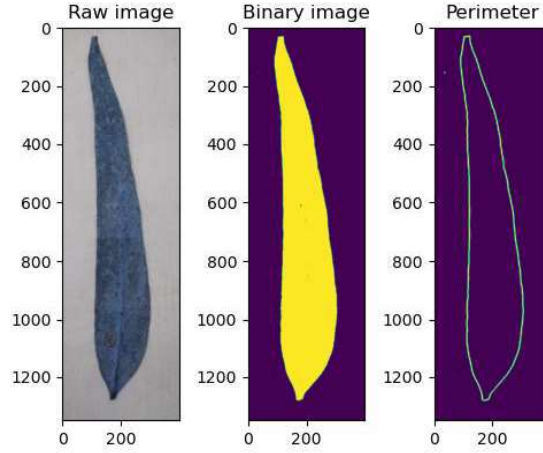
4.3. Caracterización de la muestra

Luego, en el laboratorio se pusieron a secar la muestra en hornos a temperatura de 65°C por al menos 12 horas, siguiendo el procedimiento de trabajos previos [28, 29, 30]. Luego, con las hojas secas se midió la densidad de masa utilizando etanol con el método del desplazamiento de este con la muestra [22], considerando hojas de las 3 muestras que se sacaron en el bosque. También, en el laboratorio se calculó de manera experimental la relación superficie volumen ω debido a la complejidad de la forma de la hoja del eucalyptus, en donde esta información es relevante para poder utilizarlo en el modelo, tomando imágenes de las hojas y a través del Open CV (módulo de Python) se pudo estimar el área y perímetro [31]. Por otro lado, para poder estimar el volumen de la hoja se debía considerar el grosor de esta, en donde en la mayoría de los casos se considera como plana, pero en este caso se estimó con un calibrador, con el cual se tomaba la medida por lo menos en cinco partes para poder calcular un promedio de este.

Considerando lo anteriormente encontrado, en este estudio se evalúa con una fracción de volumen de combustible de $\alpha = 0,03$, lo cual era lo más representativo encontrado en el terreno. Posteriormente, se determinó utilizar 2 medidas adicionales $\alpha = 0,05$, y $\alpha = 0,07$ para poder verificar el comportamiento del modelo teórico propuesto. Por otro lado, otra consideración que se tomó para poder realizar pruebas repetibles y lo más similares entre sí, se consideraron solamente hojas completas que se encontraban en el piso del bosque, descartando las que estaban en descomposición, debido al contacto que tenían con el suelo y por el tiempo que se encontraban en el sector.



Figura 4.1: Procedimiento experimental desde la obtención de la muestra (paso 1) hasta el cálculo de su densidad (paso 3).



También, es importante mencionar que algunas características de las hojas de eucalyptus, como la densidad (ρ), la relación superficie-volumen (ω) y el calor específico (c_p), se midieron experimentalmente y los valores se pueden expresar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Las propiedades del combustible y los parámetros utilizados.

	Parametro	Valores	Unidad
Fuel	ρ_s	0.7521 ± 0.065	g/mL
	$c_{p,d}$	2700	J / kg K
	$\alpha_{1,2,3}$	0.03 - 0.05 - 0.07	—
	T_∞	298	K
General	l_z	0.05	m
	r_i	0.02	m
	r_0	0.06	m

4.4. Montaje experimental

Se llevaron a cabo los experimentos de ignición piloteada con hojas de *Eucalyptus globulus* utilizando el I-FIT, el cual es un dispositivo desarrollado en Chile que fue diseñado para simular condiciones similares a las que se presentaría si una partícula incandescente encendiera la biomasa y su funcionamiento es explicado en investigaciones anteriores que se encuentran en la literatura [4, 32].

El I-FIT es una estructura personalizada en forma cúbica, el cual fue construido con materiales que le entregan estabilidad y resistencia al calor, cuenta con perfiles Thorlabs y protegida con Plexiglas, excepto en la cara frontal y superior, de esta manera evita las interferencias del ambiente mientras se realizan los experimentos para que las pruebas puedan ser repetibles. Cuenta con un heater eléctrico,

el cual simula el efecto de una pavesa idealizada. Este heater está conectado a una red eléctrica de 220 V y su potencia es controlada a través de un transformador trifásico llamado Variac para poder entregar voltajes de salida superior (voltaje de salida máximo es de 250 V) [4, 32]. El dispositivo es colocado cuidadosamente en el medio del estrato vegetal, dándole su posición ideal a través de un motor lineal. Este mecanismo es utilizado para tener un descenso y ascenso rápido, preciso y seguro del heater, tiene una velocidad de hasta 3mm/s, y permite que este baje sin inconveniente y no tener contacto directo con la muestra. Otro dispositivo que se encuentra involucrado es esta parte es el kanthal, el cual funciona como piloto de ignición y está situado entre el Heater y la muestra vegetal.

La muestra vegetal es colocada en un basket, el cual fue construido con acero inoxidable debido a su densidad relativamente baja y por la capacidad de soportar altas temperaturas. Al momento de realizar las pruebas para poder cumplir con las fracciones en volumen de las distintas campañas, se debió identificar la masa asociada para entregar cada una de ellas. Estas masas fueron identificadas de la siguiente forma.

La fracción en volumen del material (α) se calcula como:

$$\alpha = \frac{v_{fuel}}{v_{basket}} \quad (4.1)$$

En donde el volumen del basket es 625.37 cm³ y el volumen de la muestra es calculada a través de la densidad y la masa de la misma, en donde la densidad es un dato conocido a través del método de desplazamiento. Conociendo el volumen necesario para entregar la fracción solicitada, se determina la masa necesaria para poder realizar los experimentos de manera repetible.

Otro componente importante del I-FIT son las termocuplas, las cuales son el instrumento que se utiliza para medir las temperaturas de las distintas pruebas realizadas, están conectadas a un sistema de adquisición de datos para poder obtenerlos en cada prueba realizada.

Antes de realizar las pruebas, se calibró el heater para poder establecer de manera correcta el flujo de calor incidente deseado. Esto se realizó utilizando un radiómetro, el dispositivo fue colocado en la misma ubicación radial de la cara interna del basket, aplicando diferentes niveles de voltaje, conociendo la relación de potencia eléctrica proporcionada y la radiación incidente. Así, se estableció la relación del flujo de calor incidente deseado, controlándolo a través de la potencia del heater.

4.5. Preparación de la muestra

Para realizar la preparación de las muestras en el laboratorio, se realizó limpieza de estas y se introdujeron en un horno especial para el proceso de secado a 65°C durante 24 horas usando el horno Memmert [30, 32]. Una vez secas las muestras, se colocaron cuidadosamente en el basket. La disposición del volumen de muestra que fue otorgado corresponde a la simulación del lecho forestal, de esta manera poder acomodarlas de la forma más natural posible. El basket es situado en el centro del I-FIT en donde la muestra se le introducen las termocuplas a 3 alturas diferentes, donde cada una de estas tiene 5 medidores de temperatura. Debido a que el basket fue diseñado para acículas de pino, las cuales

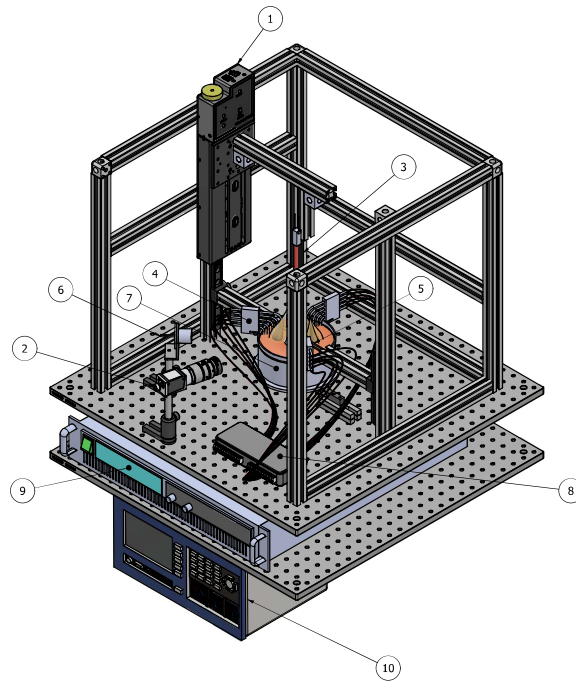


Figura 4.2: "The Idealized-Firebrand Ignition test"(I-FIT). (1): Motor lineal, (2): Camara Basler, (3): Heater, (4): Termocuplas, (5): Piloto (Kanthal), (6): Radiometro, (7): Basket, (8): Data acquisition system, (9): Variac, (10): Fuente de poder.

tienen distinto tamaño y forma, las hojas de eucalyptus debieron ser modificadas en tamaño para que pudiesen ser depositadas en el instrumento y poder lograr las fracciones en volumen deseadas evaluadas. Por lo que se tomó la decisión de cortar las hojas en diferentes tamaños dependiendo del valor del α requerido en cada prueba. A pesar de que se depositaron las muestras de tal manera para que se acercasen a la naturalidad, con todas las modificaciones realizadas para las pruebas hace que se aleja de la realidad que se encuentra en el lecho de un bosque. Sin embargo, esto permite generar una mayor homogeneidad y controlar la fracción en volumen deseada. En la siguiente figura se puede observar la variabilidad que tienen las hojas de eucalyptus con respecto a su perímetro, área y superficie volumen (ω).

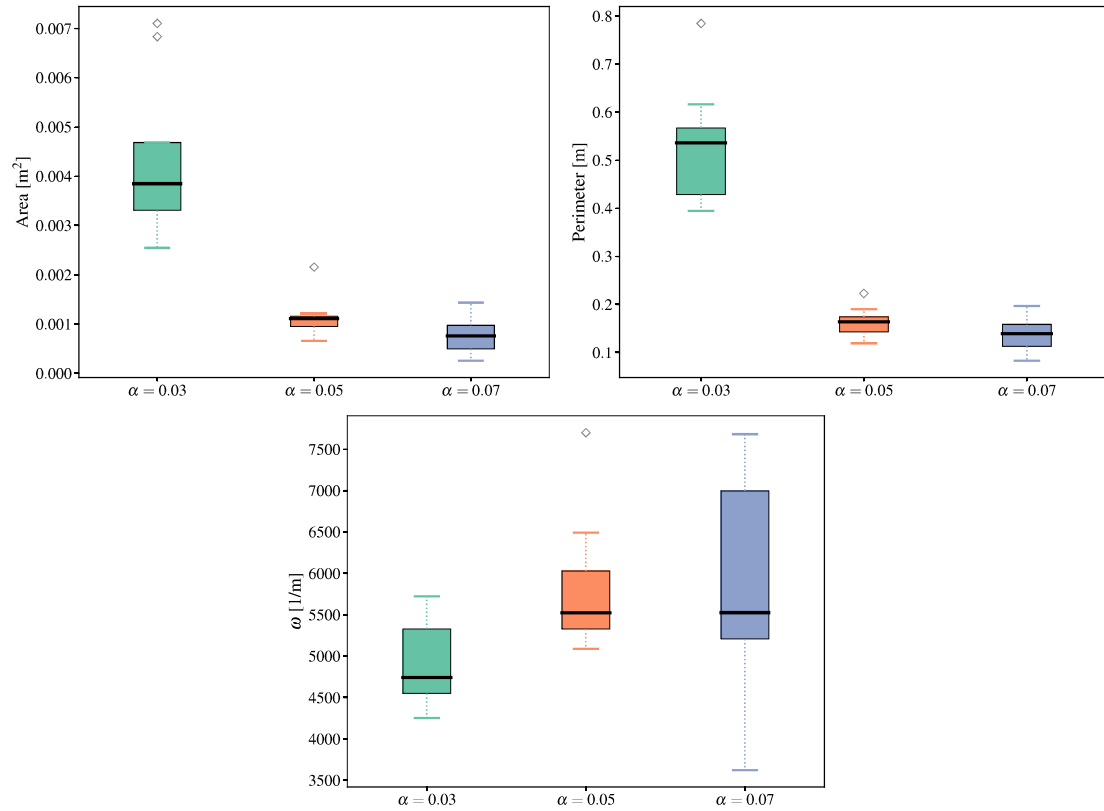


Figura 4.3

A continuación se muestran algunas imágenes de la preparación de la muestra en el laboratorio:



Figura 4.4: Basket con Eucalyptus.



Figura 4.5: Muestra en I-FIT

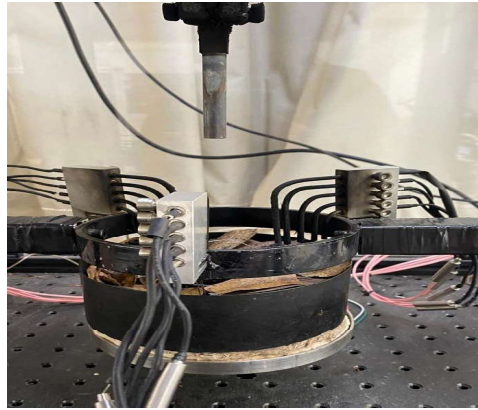


Figura 4.6: Preparación de la muestra.

4.6. Procedimiento experimental

Posterior a la preparación de la muestra, el basket es colocado en el centro del I-IFT, el cual debe ser alineado para que la parte central de este encaje con el heater. En caso de no posicionar el heater en el centro, puede provocar un daño en el equipo o hacer que la muestra pase a ignición antes de tiempo real debido al contacto. Luego se deben colocar las termocuplas, las cuales atraviesan la cama vegetal para tomar las medidas de la temperatura a distintas alturas.

Al lograr que el basket esté alineado con el equipo, en el variac se establecen las salidas de voltaje que será reflejadas en el heater emitiendo distintos flujos de radiación incidente. Es importante ir aumentando los niveles de voltaje de forma gradual, en este caso se realizaron subidas de 50 [v] para no provocar daños en la pavesa idealizada. Cuando el voltaje alcanza el nivel deseado se debe mantener por 120 segundo para que logre un estado estacionario, luego de este tiempo se le entregan 18 segundos adicionales para que el heater baje a través del motor lineal alcanzando la altura que lo centra en medio de la muestra que se encuentra en el basket, este proceso tiene que ser monitoreado debido a que puede existir errores de alineación, los cuales pueden provocar daños o generar pruebas con datos que no corresponden a los reales.

Al momento de posicionar el heater de manera correcta se procede a realizar las mediciones de temperatura y se debe prender el piloto (kanthal). Se comienza a cronometrar el tiempo para poder determinar el momento de ignición de la muestra, el tiempo es controlado tanto a través de los equipos como con un cronómetro para poder ir evaluando las pruebas de manera simplificada y rápida.

Al producirse la ignición, se detiene la medición del tiempo, el heater es levantado rápidamente a través del motor lineal para evitar daños, debido a la exposición de la llama y altas temperaturas. Se apaga el piloto, se detiene la medición de temperatura a través de las termocuplas. La muestra es tapada con una placa metálica para apagar el fuego y posteriormente es retirado el basket. Si la ignición no se produce, se debe realizar la toma de datos por lo menos por 120 minutos debido a que luego de este tiempo la probabilidad de que ocurra la ignición es muy baja. La cantidad de repeticiones por prueba fueron 5, en donde se mantenía constante la fracción en volumen y el flujo de radiación

entregado a la muestra.

Cabe destacar que para cada fracción en volumen (α) se debe buscar el flujo crítico de radiación, el cual es el último flujo en el cual se observa la ignición.

A continuación, en la figura 4.7 se muestran algunas imágenes del procedimiento en el laboratorio:

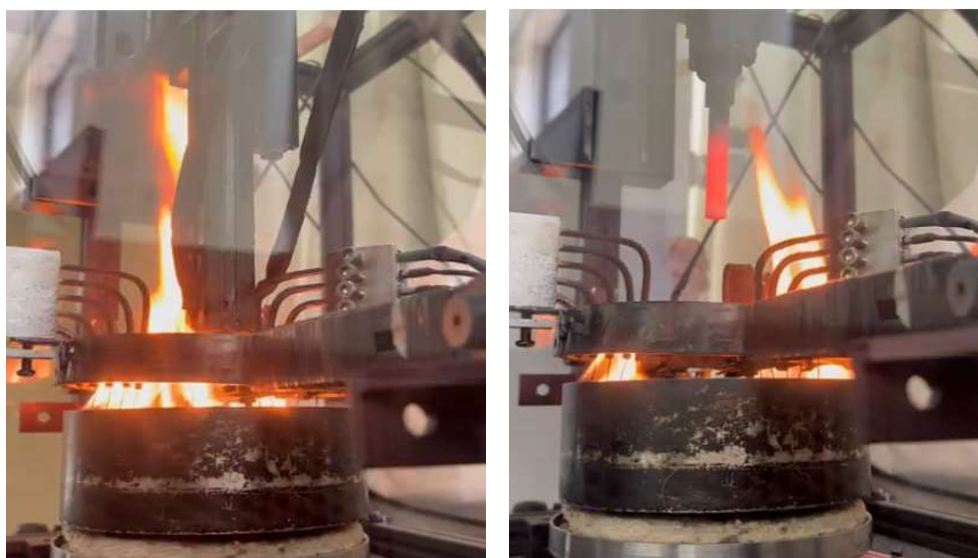


Figura 4.7: Ignición de la muestra

4.6.1. Determinación de Temperatura

Como fue mencionado anteriormente, la medición de temperatura se realizó a través de las termocuplas, las cuales atraviesan la cama vegetal. Estas se encuentran en 3 alturas diferentes para medir la temperatura de la parte del fondo, medio y superficial; en cada una de estas alturas se encuentran 5 termocuplas. Cada una de ellas mide en tiempo real la temperatura la cual es enviada al DAQ, así será entregada esta información al computador para posteriormente poder analizar estos datos. La medición comienza cuando el heater se encuentra posicionado en el centro del basket con el flujo radiativo incidente deseado y el piloto encendido. La medición termina cuando se produce la ignición y es levantado el heater a través del motor lineal o al pasar los 120 minutos.

4.6.2. Determinación del Tiempo de Ignición

El tiempo de ignición se determina considerando la presencia de la llama, en el momento que se observa la primera llama, es cuando se finaliza el tiempo cronometrado y se determina como tiempo de ignición. Para poder realizar una medición más precisa al momento de comenzar la prueba con todas las condiciones anteriormente mencionadas, en el DAQ existe una opción la cual permite cambiar un número de 0 a 1, cuando comienza la prueba se marca el número 1 y cuando se produce la ignición se devuelve al valor 0.

4.6.3. Determinación del Flujo Crítico Incidente

Para poder determinar el flujo crítico incidente ($\dot{q}''_{inc,cri}$) se comienza aplicando una radiación incidente elevada de 27,58 kW/m². Esta radiación se va disminuyendo de 4 kW/m² aproximadamente y registrando los tiempos de ignición, hasta llegar a un nivel de radiación que no se tenga la certeza de que la ignición ocurre. Se realizaron pruebas también con flujos de radiación incidentes bajas las cuales no produjeron ignición, para luego ir determinando un promedio entre las que si lo lograron y probar bajo esta nueva condición.

5 | Modelo Analítico

5.1. Formulación general

Para entender el efecto de las propiedades de la masa de combustible en el comportamiento de la ignición de los combustibles forestales y para entregar una herramienta predictiva en el proceso de ignición por dispersión, se desarrolló un modelo térmico que representa el problema físico. A partir de la ecuación general de la conservación de energía para un medio poroso, donde se trata como un medio continuo equivalente con una fase sólida s y una fase gaseosa g con un equilibrio térmico local [32, 2], de esta manera es posible establecer un balance de energía global.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s h_s + \alpha_g \rho_g h_g) = k_s \nabla^2 T - \mathbf{v}_g \cdot \nabla \alpha_g \rho_g - \nabla \dot{q}_R'' \quad (5.1)$$

Donde $h_i = \int_{T_\infty}^T c_{p,i} dT$ se define para cada fase i (sólida y gaseosa, respectivamente). Debido a que la entalpía asociada a la fase gaseosa $\alpha_g \rho_g c_{p,g}$ es aproximadamente mil veces menos que la entalpía de la fase sólida del combustible; se omite la gradiente de la ecuación de energía. Por lo que, basándose en las características del problema físico, se tienen las siguientes consideraciones:

- Se considera la transferencia de calor unidimensional en la dirección r .
- Se asume que todas las propiedades térmicas de cada fase son constantes.
- Se asume que el combustible y el contenido de humedad permanecen inertes y constantes, respectivamente, durante todo el proceso de calentamiento hasta que se produce la ignición [32, 27, 33].
- Para este caso, el tratamiento apropiado de la ecuación de transferencia radiativa sería una penetración en profundidad [32, 2] y para esta geometría específica, la solución precisa es el método de Aproximación P1 [34].
- Considerando que la muestra está limitada por el tamaño del soporte de muestras, donde l_z es su altura, r_i y r_o son los radios interno y externo respectivamente, el operador $*2/l_z(r_o^2 - r_i^2) \int_0^{l_z} \int_{r_i}^{r_o} r dr dz$ es aplicado en ambos lados de la ecuación de energía, obteniendo un balance de energía en términos de temperatura promedio espacial $\bar{T}$ [32].

Considerando estas suposiciones, el modelo pertenece a la teoría de ignición térmica [33]. Es importante mencionar que es un desafío aplicar este modelo a este caso por la forma de las hojas de eucalyptus, debido a que ha sido aplicado anteriormente con agujas de pino bajo diferentes condiciones y estas tienen diferentes características [32, 29]. En particular, se producirán diferencias significativas en los valores de los parámetros ω y α en comparación con las agujas de pino por lo anteriormente mencionado. Por otro lado, este trabajo tiene como objetivo probar si las suposiciones sobre el transporte

radiativo dentro del lecho de combustible poroso, el cual ha sido validado ampliamente para lechos de agujas de pino, son aplicables al eucalyptus, el cual está siendo utilizado como combustible. Con estas consideraciones, el balance de energía unidimensional se transforma en:

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_s \rho_s h_s = - \frac{2}{(r_o^2 - r_i^2)} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(r k_s \frac{\partial T}{\partial r} - \alpha_g \rho_g h_g r u_g \right) \right]_{r=r_o} - \left(r k_s \frac{\partial T}{\partial r} - \alpha_g \rho_g h_g r u_g \right) \Big|_{r=r_i} - \frac{2}{(r_o^2 - r_i^2)} (r \dot{q}_r'') \Big|_{r_i}^{r_o} \quad (5.2)$$

En donde el lado derecho de la Ecuación 5.2, incluye la transferencia de calor por conducción, convección y radiación que se encuentra dentro del medio, donde k_s es la conductividad de la sólida y u_g es a velocidad radial de la fase gaseosa.

5.2. Modelo radiativo

Para obtener una expresión del flujo radiativo dentro del medio poroso, la divergencia del término radiativo ($\nabla \cdot \dot{q}_r''$) se modeló basándose en la Aproximación P1, el cual es un método utilizado para esta transferencia se transforme en un conjunto más simple de ecuaciones diferenciales, lo que facilita su resolución en problemas prácticos, también permite el análisis de problemas radiativos en geometrías multidimensionales, entre otras condiciones que es capaz de simplificar para resolver problemas de transferencia radiativa (RTE) en una variedad de contextos, proporcionando un balance entre precisión y manejabilidad matemática [34]. La ecuación de RTE se resuelve basándose en las siguientes ecuaciones y condiciones de contorno (más detalles en [32]).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \dot{q}_r'') = \kappa (4\pi I_b - G) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial G}{\partial r} = -3\kappa \dot{q}_r'' \quad (5.4)$$

$$r = r_i : \quad G + 2\dot{q}_r'' = 4(\dot{q}_{inc}'' + \sigma T_\infty^4) \quad (5.5)$$

$$r = r_o : \quad G + 2\dot{q}_r'' = 4\sigma T_\infty'^4 \quad (5.6)$$

donde $G = G(r)$ es la radiación incidente local en la dirección r y σ es la constante de Stefan-Boltzmann. La temperatura del medio se toma como la temperatura del volumen media $\bar{T}$ y la temperatura circundante es T_∞ . El coeficiente de absorción, $\kappa = \alpha_s \omega_s / 4$, se asume constante a lo largo del eje r [28, 35]. Entonces, una solución para el término radiativo dentro del medio en función de la posición radial en profundidad se da por:

$$\dot{q}_r''(r) = c_1 I_1 \left(\sqrt{3\kappa} r \right) + c_2 K_1 \left(\sqrt{3\kappa} r \right) \quad (5.7)$$

donde I_1 y K_1 son funciones de Bessel modificadas del primer y segundo tipo, respectivamente. A partir de las Ecuación 5.5 Ecuación 5.6 se obtienen las constantes c_1 y c_2 .

5.3. Modelo Espacio-Promediado

Para resolver el balance energético de la Ecuación 5.2, la ecuación de continuidad y las condiciones de borde en la superficie del combustible sólido se agrupan en un coeficiente global de transferencia de calor de la superficie h_{comb} que incluye los términos de convección y difusión. De este modo, se utilizan las siguientes condiciones iniciales y de borde en términos de variables promediadas espacialmente:

$$r = r_i : \quad \left(-k_s \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha_g \rho_g h_g u_g \right) \Big|_{r=r_i} = h_{comb} (\bar{T}(t) - T_\infty); \quad (5.8)$$

$$r = r_o : \quad \left(-k_s \frac{\partial T}{\partial r} + \alpha_g \rho_g h_g u_g \right) \Big|_{r=r_o} = 0; \quad (5.9)$$

$$t = 0 : \quad \bar{T}(0) = T_\infty \quad (5.10)$$

Solo se consideran las pérdidas convectivas en la superficie interna en $r = r_i$ porque se considera que el flujo de calor incidente y las pérdidas radiativas son absorbidos a lo largo del volumen del medio, y estos efectos están incluidos en la Ecuación 5.4. Entonces, el modelo para el comportamiento radiativo dentro del medio en función de la dirección r (Ecuación 5.7) y el balance energético general (Ecuación 5.2) puede ser combinado en una ecuación general para la temperatura promedio:

$$\alpha_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = -\frac{h_{comb}}{r_i} (\bar{T}(t) - T_\infty) - \frac{2}{(r_o^2 - r_i^2)} (r_o \dot{q}_r''(r_o) - r_i \dot{q}_r''(r_i)) \quad (5.11)$$

La Ecuación 5.11 tiene la forma de una ecuación diferencial ordinaria no lineal de primer orden. Desafortunadamente, su solución analítica exacta es implícita [36]. Posteriormente, se utilizará el siguiente enfoque para simplificar la ecuación de calor y comparar los resultados. Primero, todos los términos independientes de temperatura se agrupan en los coeficientes b_1 , b_2 y b_3 que solo dependen de r_i , r_o y k .

$$\alpha_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = -b_3 h_{comb} (\bar{T}(t) - T_\infty) + b_1 \dot{q}_{inc}'' - b_2 (\bar{T}^4 - T_\infty^4) \quad (5.12)$$

Se aplica una expansión de serie de Taylor para el término no lineal $\bar{T}^4$ alrededor de la temperatura ambiente T_∞ para convertir la Ecuación 5.12 en una ecuación diferencial lineal ordinaria. Así, el modelo aproximado se reescribe en forma compacta utilizando el coeficiente $h_T = h_{comb} + 4T_\infty^3 b_2/b_3$, obteniendo una ecuación diferencial lineal que se puede resolver con facilidad. Cabe destacar que esta expresión, debido al promedio espacial aplicado sobre T , es similar a la ecuación que describe el calentamiento de un sólido térmicamente delgado:

$$\alpha_s \rho_s c_{p,s} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = -b_3 h_T (\bar{T}(t) - T_\infty) + b_1 \dot{q}_{inc}'' \quad (5.13)$$

5.4. Evolución de la temperatura

Para resolver la Ecuación 5.13, se definen los siguientes parámetros adimensionales y variables, lo que permite realizar un análisis dimensional:

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\bar{T} - T_\infty}{\bar{T}_{ig} - T_\infty}; & \tau &= \frac{\alpha_s \rho_s c_{p,s} (\bar{T}_{ig} - T_\infty)}{b_1 \dot{q}_{cri}''}; \\ \psi &= \frac{b_3 h_T (\bar{T}_{ig} - T_\infty)}{b_1 \dot{q}_{cri}''}; & \varphi &= \frac{\dot{q}_{inc}''}{\dot{q}_{cri}''}. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Entonces, la Ecuación 5.13 se puede reescribir en una forma normalizada y considerando los parámetros y variables definidas anteriormente de la siguiente manera:

$$\Theta(t) = \frac{\phi}{\varphi} \left(1 - \exp \left(-\frac{\varphi}{\tau} t \right) \right) \quad (5.15)$$

donde se aplica la condición inicial $\Theta|_{t=0} = 0$ (de la Ecuación 5.10). Finalmente, se obtiene una solución analítica, para la evolución de la temperatura promedio dentro de una muestra de hojas de eucalyptus, sometida a un flujo de calor incidente de una brasa idealizada:

$$\bar{T}(t) = T_\infty + \frac{b_1 \dot{q}_{inc}''}{b_3 h_T} \left[1 - \exp \left(-\frac{b_3 h_T}{\alpha_s \rho_s c_{p,s}} t \right) \right] \quad (5.16)$$

5.5. Tiempo de ignición

Para poder correlacionar los datos experimentales de ignición y poder realizar una estimación de t_{ig} , se debe obtener un valor de temperatura promedio de ignición. Debido a la naturaleza del modelo, una forma apropiada es a través del uso del criterio del flujo de calor crítico en la ignición, lo cual ha sido tratado por varios autores [32, 29, 33, 3, 37]. De manera general, si la temperatura de pirólisis del material es mayor de 573,15 K, las pérdidas radiativas representan aproximadamente el 80 % de las pérdidas [3], por lo que es posible despreciar las pérdidas convectivas de la Ecuación 5.12. Si la muestra se calienta por un flujo de calor incidente, de manera que $\dot{q}_{inc}'' = \dot{q}_{cri}''$, cuando $t \rightarrow \infty$, el medio alcanzará un equilibrio térmico, donde las pérdidas por radiación son iguales al flujo de calor incidente.

$$\dot{q}_{cri}'' = \sigma (\bar{T}_{ig}^4 - T_\infty^4) \quad (5.17)$$

Dado que la ecuación de calor ha sido definida para una temperatura promedio en profundidad,

se definirá una temperatura promedio de ignición. Considerando el flujo de calor crítico como el flujo más bajo en donde se alcanza la ignición, la temperatura de ignición $\bar{T}_{ig}$ se define como la temperatura alcanzada después de la una exposición infinitamente larga. Es importante destacar que, a pesar de que este enfoque podría no ser físicamente preciso debido a la naturaleza del problema modelado, es la forma más práctica de obtener expresiones analíticas. Tomando el desarrollo estándar para tiempos de ignición cortos [27], la Ecuación 5.16 y expandiendo el término exponencial de una serie de Maclaurin, es posible obtener una solución para la diferencia de temperatura $\bar{\theta}(t) = \bar{T}(t) - \bar{T}_\infty$

$$\bar{\theta}(t) \approx \frac{b_1 \dot{q}_{inc}''}{\alpha_s \rho_s c_{p,s}} t \quad (5.18)$$

Esta solución es una función lineal de t , por lo tanto, puede ser correlacionada siguiendo la forma estándar para materiales thermally thin [17]. El punto de ignición $\bar{\theta}_{ig} = \bar{T}_{ig} - \bar{T}_\infty$ y el inverso del tiempo de retraso de ignición puede expresarse como.

$$\frac{1}{t_{ig}} = \frac{b_1 \dot{q}_{inc}''}{\alpha_s \rho_s c_{p,s} \bar{\theta}_{ig}} \quad (5.19)$$

6 | Resultados Experimentales

Se buscó estudiar y entender el comportamiento del lecho del combustible de la especie *Eucalyptus globulus*, dentro de los datos más importantes a analizar fueron los tiempos de ignición (t_{ig}), identificar los flujos críticos ($\dot{q}_{cri}''$) y el comportamiento de la temperatura, considerando diferentes fracciones de volumen partiendo desde un $\alpha = 0.03$ que es la condición más similar a lo que se encuentra en un lecho de bosque y considerando también $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.07$.

6.1. Tiempos de ignición

Para entender el comportamiento de los tiempos de ignición y del flujo del calor incidente, es importante comprender los procesos de combustión y los factores que influyen en esta conducta. En este estudio se revisó el impacto que tiene los cambios de porosidad sobre los flujos de calor y los tiempos de ignición, los cuales se caracterizaron experimentalmente y se buscaron predecir a través del modelo propuesto, para obtener una mejor interpretación de lo indicado se puede observar la Figura 6.1 y Figura 6.2.

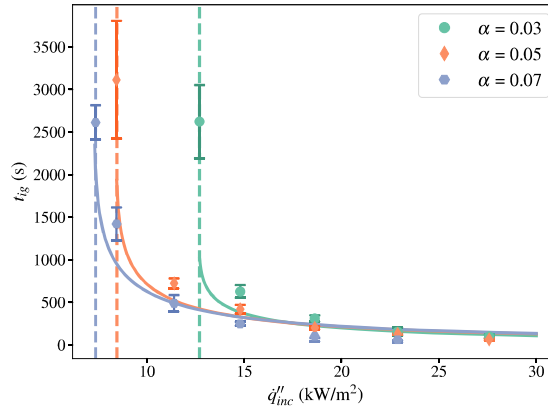


Figura 6.1: Tiempos de ignición para $\alpha = 0.03$, $\alpha = 0.05$, and $\alpha = 0.07$. Las líneas continuas corresponden a los tiempos calculados por el modelo y las líneas verticales representan el flujo de calor crítico para cada α .

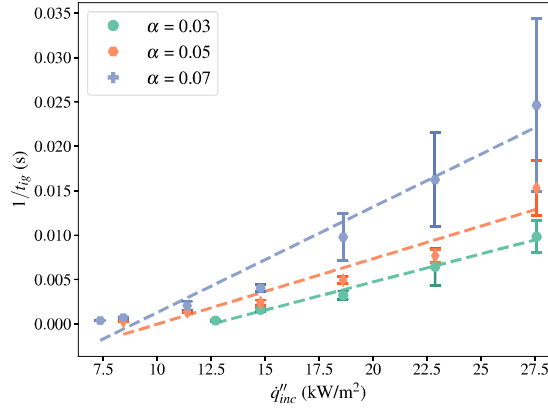


Figura 6.2: Relación entre t_{ig}^{-1} y $\dot{q}''_{inc}$ para $\alpha = 0,03$, $\alpha = 0,05$, and $\alpha = 0,07$.

La Figura 6.1 representa los tiempos de retardo de ignición de los resultados experimentales obtenidos, mostrando la variabilidad de estos. A su vez, se representan las predicciones de los tiempos de ignición utilizando el modelo propuesto a través de la línea continua con respecto al flujo de calor incidente y las líneas verticales segmentadas corresponden al flujo de calor crítico. Con la información de la figura, es posible representar de manera gráfica la influencia de las variaciones de α sobre los tiempos de ignición y flujo crítico, por lo que se puede observar que para flujos de calor incidente mayores ($\dot{q}''_{inc}$), no existen grandes variaciones en los tiempos de ignición para las diferentes fracciones de volumen consideradas.

El valor del tiempo de ignición (t_{ig}) se calcula tomando la intersección de la predicción de temperatura de la Ecuación 5.16 con la temperatura calculada de la Ecuación 5.17. En la parte experimental se llevaron a cabo simulaciones para las fracciones en volumen de 0.03, 0.05, y 0.07, en donde, para cada una de ellas, se inició con un valor de 27.58 kW/m^2 hasta el correspondiente flujo crítico ($\dot{q}''_{cri}$).

Basándose en el análisis realizado, se observa que el modelo entrega valores predictivos que se ajustan a los valores de α utilizados de manera experimental en este estudio. A su vez, se considera que este modelo puede utilizar diferentes valores de ω dependiendo de las condiciones a analizar para cada especie, como es el caso de estudio del eucalyptus globulus. Por otro lado, también se puede observar que a medida que el valor de α aumenta, el flujo de calor crítico es cada vez menor, requiriendo menores flujos de calor para producir la ignición.

En el caso de la Figura 6.2, se muestra el inverso del tiempo de ignición en función de la radiación incidente. Para un $\alpha = 0,03$ que fue el valor de porosidad medido en el lecho del bosque, se logra un buen ajuste al comportamiento lineal esperando. Sin embargo, cuando la fracción en volumen aumenta a 0.05, el ajuste no es tan preciso y cuando este valor se incrementa a $\alpha = 0,07$ implica una pérdida en la proporcionalidad entre t_{ig}^{-1} y $\dot{q}''_{cri}$. Además, se puede apreciar que este efecto se vuelve más pronunciado a medida que $\dot{q}''_{inc}$ se aproxima a $\dot{q}''_{cri}$. Cabe destacar que se puede observar que el punto de intersección de la regresión lineal con el eje de las abscisas se vuelve cada vez más pequeño debido al incremento asintótico del flujo de calor crítico para la ignición. A su vez, se debe tener en cuenta que

este comportamiento también es observado en los lechos de combustible con agujas de pino [32].

Uno de los parámetros más sensibles que se define para los lechos de combustibles porosos es α . Al momento de realizar los experimentos, se tomó la decisión de cortar las hojas para poder lograr las fracciones en volumen deseadas. Sin embargo, esto podría generar incertidumbre sobre la aplicabilidad de los resultados debido a la modificación de las condiciones reales de la especie por la intervención realizada a la muestra, en donde se observa que una pequeña variación en α provoca grandes diferencias en los tiempos requeridos para producir la ignición. Con la información obtenida es importante destacar la importancia de realizar mediciones precisas de fracción de volumen del lecho de combustible al aplicar el modelo para así no generar desviaciones en los resultados obtenidos.

6.2. Temperatura de ignición

La temperatura de ignición se midió experimentalmente a través de las termocuplas, que fueron insertadas en las muestras a diferentes alturas y distancias, considerando como centro el orificio del "basket". Se trabajó con los promedios de estas mediciones, y para el cálculo teórico se consideró el método anteriormente descrito.

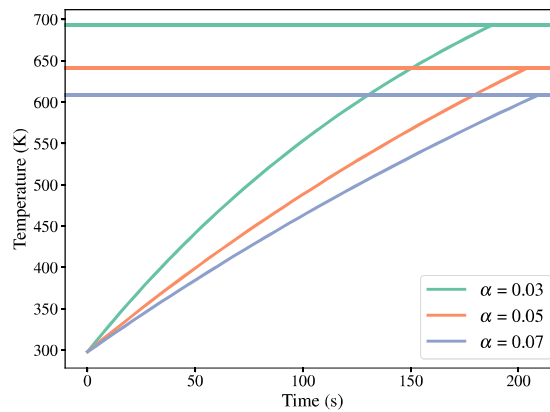


Figura 6.3: Evolución teórica de la temperatura a lo largo del tiempo para los diferentes valores de α estudiados. Las líneas horizontales representan la temperatura crítica teórica en la que se espera que ocurra la ignición.

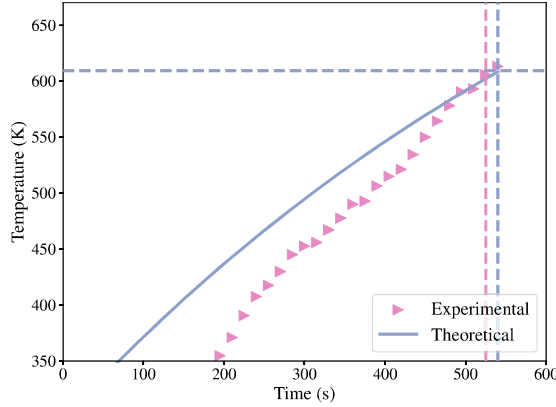


Figura 6.4: Comparación de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo entre la temperatura experimental y la teórica. Las líneas verticales discontinuas representan el tiempo crítico cuando se midió la ignición (rosado) y cuando se esperaba (azul).

En la Figura 6.3, se pueden visualizar los valores calculados de $\bar{T}(t)$ para las diferentes fracciones de volumen utilizadas en esta investigación. Se observa que, a medida que los valores de flujo de calor crítico disminuyen al incrementar el valor de α , esto se debe a que, al aumentar la fracción de volumen, las muestras reducen la temperatura necesaria para alcanzar la ignición. En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de los valores medidos de $\dot{q}_{crit}''$ y de la temperatura de ignición estimada $\bar{T}_{ig}$.

Tabla 6.1: Flujo de calor crítico para la ignición y estimación de la temperatura promedio para los α probados.

α	$\dot{q}_{crit}''$ (kW/m ²)	$\bar{T}_{ig}$ (K)
0.03	12.7	693.94
0.05	9.17	641.69
0.07	7.24	609.17

En la Figura 6.4 se muestra una comparación de los datos experimentales y los valores calculados de la temperatura promedio. En color azul se presentan los valores teóricos, y en color rosado, los resultados experimentales del comportamiento de un lecho de combustible con $\alpha = 0,05$ y un flujo de calor incidente de $\dot{q}_{inc}'' = 20,7 \text{ kW/m}^2$, desde el inicio del experimento hasta que se genera la ignición. Las diferencias que se pueden observar entre los valores calculados y los medidos experimentalmente se atribuyen a las limitaciones en las mediciones realizadas con las termocuplas, debido a que el dispositivo utilizado inicialmente fue confeccionado para trabajar con acículas de pino y este mismo fue adaptado para la especie de eucalyptus.

Cabe destacar que se consideraron los promedios de las mediciones obtenidas durante el experimento, por lo que las temperaturas más bajas registradas cerca de la pared exterior reducen la temperatura promedio de la muestra, obteniendo resultados inferiores a los predichos por el modelo. También se observó, en varios casos, que las termocuplas no tenían el contacto ideal con las hojas, debido a que el IFIT es una estructura que fue diseñada para trabajar con acículas de pino, lo cual afectó las mediciones. A pesar de estas limitaciones, los tiempos de ignición predichos por el modelo muestran ser precisos al momento de realizar una comparación, generando un margen de error de aproximadamente 10 segundos en comparación con los valores experimentales registrados.

6.3. Correlación de los resultados

Basándose en la normalización de los parámetros que se muestran en la Ecuación 5.14, se puede escribir la solución adimensional como $\Theta = \varphi \cdot t/\tau$ y, cuando se aproxima al punto de ignición, se convierte en $1 = \varphi \cdot t_{ig}/\tau$, generándose una relación lineal entre φ y τ/t_{ig} . En algunos estudios anteriores [32, 29, 28] se utilizó una relación equivalente para correlacionar datos experimentales, extraer propiedades del material y obtener una forma rápida de predecir los tiempos de ignición como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{\tau}{t_{ig}} = \frac{\dot{q}_{inc}''}{\dot{q}_{cri}''}. \quad (6.1)$$

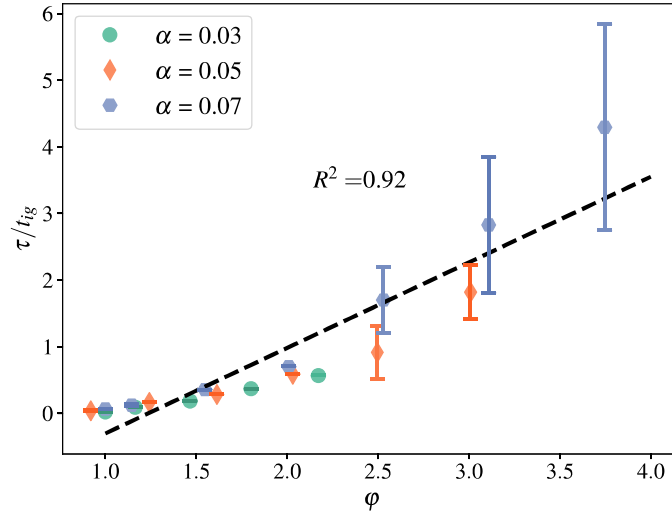


Figura 6.5: Correlación de los datos experimentales utilizando la relación entre $\tau \cdot t_{ig}^{-1}$ and φ . La línea discontinua expresa una regresión lineal de los datos considerando todos los valores de α probados.

La Figura 6.5 muestra la correlación de datos, donde se puede observar una buena correspondencia para $\alpha = 0.07$, con un valor de R^2 mayor que el resto de las condiciones probadas en el estudio. A su vez, es importante destacar que se observan mejores resultados, en particular para los datos con mayor flujo de calor incidente. Este comportamiento está asociado a la variabilidad que se observa en las hojas de eucalyptus, tanto en tamaño, densidad como en espesor. Para este estudio, el utilizar un solo valor de ω , no es una condición representativa, debido a la variabilidad morfológicas de las hojas del eucalyptus.

Finalmente, es recomendable llevar a cabo más pruebas en eucalyptus para obtener una muestra más representativa que permita comprender de manera más efectiva cómo afectan las variaciones en los resultados estudiados para poder así conseguir un mayor análisis de esta especie. Cabe destacar que el soporte utilizado en este estudio fue diseñado originalmente para trabajar con acículas de pino, las cuales son más pequeñas y delgadas, lo que afecta en la precisión de las mediciones. Por lo tanto,

adaptar el soporte para hojas de eucalyptus sería recomendable para poder situarlas de una mejor manera que se acomode a su morfología.

7 | Conclusiones y Comentarios

En este estudio, se realizaron pruebas para investigar el comportamiento de ignición y el impacto de los flujos de calor incidentes en lechos de combustible de *Eucalyptus globulus*. Se utilizó la estructura del I-FIT para realizar las mediciones experimentales, simulando la acción de las pavesas en los lechos de bosques y un modelo térmico que fue adaptado, debido a que inicialmente estaba diseñado para agujas de pino. Dado que esta especie es la segunda con mayor presencia en el territorio nacional, representa un riesgo en los incendios forestales, por lo que entender las condiciones de ignición y propagación es fundamental para la gestión de riesgos. Los experimentos se diseñaron para simular las condiciones de fracciones de volumen reales de los bosques chilenos.

Tras revisar los resultados, se puede concluir que la porosidad influye de manera importante en los tiempos de ignición y en los flujos de calor crítico. A mayores flujos de calor incidentes, el comportamiento es semejante, mostrando tendencias similares. Sin embargo, las diferencias en las porosidades generan variaciones en los tiempos de ignición y en los flujos críticos requeridos. También se puede observar que, al incrementar la fracción de volumen, se disminuye la temperatura necesaria para la ignición, lo cual se encuentra alineado con los resultados del modelo y que los flujos de calor crítico varían en función de la fracción de volumen.

El modelo térmico adaptado para la especie es efectivo, pero se identificaron varios desafíos experimentales y limitaciones en las mediciones. Por un lado, las hojas de eucalyptus tienen una variabilidad morfológica significativa, lo que generó dificultades al momento de obtener una muestra representativa y homogénea. Además, el equipo experimental no fue diseñado para la especie en estudio, por lo que se tuvo que adaptar la muestra, generando diferencias entre los resultados teóricos y experimentales. A pesar de estas limitaciones, el modelo logró predecir los tiempos de ignición con un margen de error de aproximadamente 10 segundos en comparación con los valores experimentales.

También es importante destacar que los parámetros experimentales y las mediciones realizadas se utilizaron para la validación del modelo teórico, a través de la correlación de datos y la observación de la influencia de la fracción de volumen y la relación superficie-volumen en los tiempos de ignición, verificando que es efectivo bajo ciertas condiciones. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones, como la pérdida de proporcionalidad en porosidades mayores, lo que sugiere que, aunque los supuestos son precisos en un rango determinado, se requiere una mayor adaptación y más pruebas para afinar el modelo y poder aplicarlo en diversos escenarios.

El estudio también evidencia una sensibilidad del modelo en el parámetro de α , por lo que es clave entender cómo afectan los resultados, ya que pequeñas variaciones pueden alterar significativamente los tiempos de ignición. Por lo tanto, realizar mediciones precisas, ajustadas a la fracción de volumen y a la morfología del lecho de combustible, es de suma importancia para asegurar la aplicabilidad del modelo. En particular, la pérdida de proporcionalidad entre el inverso del tiempo de ignición y el flujo de calor crítico observado en fracciones de volumen mayores muestra que hay limitaciones en el modelo.

Sin embargo, dado que estas no son las condiciones reales que se encuentran en un bosque, se considera aceptable.

Por lo tanto, se puede concluir que, los resultados obtenidos y los análisis realizados servirán para poder impulsar nuevas investigaciones acerca del *Eucalyptus globulus*, al realizar modificaciones de las variables de estudio se podrá obtener más información acerca de cómo esta especie inicia su ignición dentro de los bosques forestales, si bien el modelo adaptado es capaz de predecir con precisión los tiempos de ignición para lechos de la especie en estudio, es fundamental realizar modificaciones al equipo experimental para adaptarlo mejor a la morfología de las hojas de eucalyptus, así se podrá ir ajustando el modelo predictivo para que sea cada vez más certero y confiable. Además, se recomienda aumentar el tamaño de la muestra y realizar más pruebas para capturar mejor la variabilidad de la especie, lo que permitirá mejorar la fiabilidad y precisión de las predicciones. Es importante mencionar que estos ajustes no solo ayudan a afinar el modelo para esta especie en particular, sino que también aportan información valiosa para la gestión y se podrá tomar medidas preventivas para evitar el daño provocado por los incendios, sobre todo en las épocas de mayor riesgo de catástrofe, generando información para desarrollar estrategias de control y mitigación basadas en datos precisos y representativos. A su vez, la investigación impulsará estudios relacionados con otras especies que sean de interés dentro de los bosques forestales para poder abarcar casi la totalidad de las plantaciones y se podrá replicar el modelo predictivo para la obtención de información y entendimiento del comportamiento de la especie en cuestión.

Bibliografía

- [1] Center for Climate and Resilience Research. Causas de los incendios entre las regiones de valparaíso y la araucanía. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/Informe-CR2-IncendiosforestalesenChile.pdf>. (document), 1.1, 1.2
- [2] N Hernández, A Fuentes, P Reszka, and AC Fernández-Pello. Piloted ignition delay times on optically thin pmma cylinders. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3):3993–4000, 2019. 1.2.1, 2, 5.1, 5.1
- [3] MA Delichatsios, TH Panagiotou, and F Kiley. The use of time to ignition data for characterizing the thermal inertia and the minimum (critical) heat flux for ignition or pyrolysis. *Combustion and Flame*, 84(3-4):323–332, 1991. 1.2.1, 2, 5.5
- [4] N Hernández, A Fuentes, JL Consalvi, and JC Elicer-Cortés. Spontaneous ignition of wildland fuel by idealized firebrands. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 95:88–95, 2018. 1.2.1, 2, 4.4
- [5] Gobierno de Chile. Nuestro país. <https://www.gob.cl/nuestro-pais/>. 1.2.2
- [6] Gobierno de Chile. Incendios forestales. 1.2.2
- [7] Matthew D Hurteau, John B Bradford, Peter Z Fulé, Alan H Taylor, and Katherine L Martin. Climate change, fire management, and ecological services in the southwestern us. *Forest Ecology and Management*, 327:280–289, 2014. 1.2.2, 2
- [8] Gobierno de Chile. Tierra. 1.3
- [9] CONAF. Sistema de información territorial sit conaf. 1.3
- [10] Cecilia Smith-Ramírez. The chilean coastal range: a vanishing center of biodiversity and endemism in south american temperate rainforests. *Biodiversity & Conservation*, 13:373–393, 2004. 2
- [11] Romain Bertrand, Gabriela Riofrio-Dillon, Jonathan Lenoir, Jacques Drapier, Patrice De Ruffray, Jean-Claude Gégout, and Michel Loreau. Ecological constraints increase the climatic debt in forests. *Nature communications*, 7(1):12643, 2016. 2
- [12] Albert Simeoni, JC Thomas, Pauline Bartoli, P Borowieck, P Reszka, F Colella, Paul-Antoine Santoni, and José Luis Torero. Flammability studies for wildland and wildland–urban interface fires applied to pine needles and solid polymers. *Fire Safety Journal*, 54:203–217, 2012. 2
- [13] William RL Anderegg, Anna T Trugman, Grayson Badgley, Christa M Anderson, Ann Bartuska, Philippe Ciais, Danny Cullenward, Christopher B Field, Jeremy Freeman, Scott J Goetz, et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 368(6497):eaaz7005, 2020. 2
- [14] Bernhard Schuldt, Allan Buras, Matthias Arend, Yann Vitasse, Carl Beierkuhnlein, Alexander Damm, Mana Gharun, Thorsten EE Grams, Markus Hauck, Peter Hajek, et al. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on central european forests. *Basic and Applied Ecology*, 45:86–103, 2020. 2
- [15] Susan Trumbore, Paulo Brando, and Henrik Hartmann. Forest health and global change. *Science*, 349(6250):814–818, 2015. 2
- [16] Fantina Tedim, Ruben Remelgado, Célia Borges, Salette Carvalho, and João Martins. Exploring the occurrence of mega-fires in portugal. *Forest Ecology and Management*, 294:86–96, 2013. 2

- [17] Esko Mikkola and Indrek S Wichman. On the thermal ignition of combustible materials. *Fire and Materials*, 14(3):87–96, 1989. 2, 5.5
- [18] Pierrick Mindykowski, M Jørgensen, Staffan Svensson, and Grunde Jomaas. A simple correlation for monitoring the ignition propensity of wet nordic spruce wood. *Fire safety journal*, 107:186–192, 2019. 2
- [19] VILLERS RUÍZ and MARÍA DE LOURDES. Incendios forestales. *Ciencias*, (081), 2009. 3.1.1
- [20] Luís Guadalupe Zárate López. *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004. 3.1.4
- [21] Neil G Sugihara. *Fire in California’s ecosystems*. Univ of California Press, 2006. 3.1.5.1
- [22] Virginie Tihay, Albert Simeoni, Paul-Antoine Santoni, Lucile Rossi, Jean-Pierre Garo, and Jean-Pierre Vantelon. Experimental study of laminar flames obtained by the homogenization of three forest fuels. *International journal of thermal sciences*, 48(3):488–501, 2009. 3.2.1, 3.2.1, 4.3
- [23] Robert E Keane. *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer, 2015. 3.2.2, 3.2.3, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.5, 3.2.6, 3.4.1
- [24] Yunus A Çengel. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 2007. 3.3.1, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.3
- [25] Frederick W Mowrer. Fundamentals of the fire hazards of materials. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*, 2004. 3.4, 3.4.3.1, 3.4.3.2
- [26] José Torero. Flaming ignition of solid fuels. *SFPE handbook of fire protection engineering*, pages 633–661, 2016. 3.4.2, 3.4.3.3
- [27] James G Quintiere. *Fundamentals of fire phenomena*. John Wiley New York, 2006. 3.4.4, 3.4.5, 5.1, 5.5
- [28] P Mindykowski, A Fuentes, JL Consalvi, and B Porterie. Piloted ignition of wildland fuels. *Fire Safety Journal*, 46(1-2):34–40, 2011. 4.3, 5.2, 6.3
- [29] José Ignacio Rivera, Fernando Ebensperger, Francisco Valenzuela, Leonardo Escandar, Pedro Reszka, and Andrés Fuentes. Understanding the role of fire retardants on the discontinuous ignition of wildland fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 39(3):3775–3783, 2023. 4.3, 5.1, 5.5, 6.3
- [30] Pedro Reszka, JJ Cruz, J Valdivia, F González, J Rivera, C Carvajal, and A Fuentes. Ignition delay times of live and dead pinus radiata needles. *Fire safety journal*, 112:102948, 2020. 4.3, 4.5
- [31] Gary Bradski. The opencv library. *Dr. Dobb’s Journal: Software Tools for the Professional Programmer*, 25(11):120–123, 2000. 4.3
- [32] J Rivera, N Hernández, JL Consalvi, P Reszka, J Contreras, and A Fuentes. Ignition of wildland fuels by idealized firebrands. *Fire Safety Journal*, 120:103036, 2021. 4.4, 4.5, 5.1, 5.1, 5.2, 5.5, 6.1, 6.3
- [33] Roberto Parot, José Ignacio Rivera, Pedro Reszka, José Luis Torero, and Andrés Fuentes. A simplified analytical model for radiation dominated ignition of solid fuels exposed to multiple non-steady heat fluxes. *Combustion and Flame*, 237:111866, 2022. 5.1, 5.5
- [34] About the author. In M. Modest, editor, *Radiative Heat Transfer*, pages 261–282. Oxford, 2013. 5.1, 5.2
- [35] Anatolii Mikhailovich Grishin, Vladislav Pavlovich Zima, Valerii Tikhonovich Kuznetsov, and Aleksei Ivanovich Skorik. Ignition of combustible forest materials by a radiant energy flux. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 38:24–29, 2002. 5.2

- [36] Mineo Chini. Sull'integrazione di alcune equazioni differenziali del primo ordine. *Rendiconti Istituto Lombardo (2)*, 57:506–511, 1924. 5.3
- [37] Michael J Spearpoint and James G Quintiere. Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model—effect of species, grain orientation and heat flux. *Fire safety journal*, 36(4):391–415, 2001. 5.5