

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA
MARIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA
VALPARAISO – CHILE**



**“Investigación experimental de contaminantes
generados por la combustión de leña lavada en
una estufa de calefacción residencial”**

Allinson Priscila Salinas López

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA
CIVIL MECÁNICA**

Profesor guía: Dr. Ing. Mario Toledo Torres.

Profesor correferente: Dr. Fabián Guerrero Castro.

Octubre 2022

Agradecimientos

En el transcurso de mi vida he conocido personas extraordinarias, quienes me han enseñado, ayudado y animado a seguir adelante en mis propósitos, a todas esas personas muchas gracias.

Estoy muy agradecida del excelente equipo con quienes trabajé en el Proyecto FONDEF ID20I10319, conformado por el Profesor Mario, los investigadores e investigadoras: Fabián, Lorena, Susana, Karen, Lautaro y Jaime; mis compañeros, y la ayuda de Miguel Cubillos, quienes me dieron el apoyo junto con las herramientas necesarias para realizar mi investigación.

Le agradezco especialmente a mi Dios Jehová, quién con su sabiduría e inteligencia me enseña y regala muchas bendiciones para aligerar mis cargas. Sin el nada sería posible.

A toda mi familia les agradezco por llenarme de amor día a día. Mi padre Marco y mi madre Gloria son unos guerreros, al igual que mis abuelos.

GRACIAS.

A mi Padre Celestial, mi fortaleza.

Índice de contenido

Índice de contenido	iv
<i>Índice de Figuras</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>viii</i>
<i>Índice de gráficos</i>	<i>ix</i>
<i>Glosario</i>	<i>xii</i>
<i>Resumen</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvi</i>
1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1. Contaminantes atmosféricos	3
2.1.1. Material Particulado (MP)	3
2.1.2. Monóxido de carbono (CO)	4
2.1.3. Óxidos de nitrógeno (NO _x)	5
2.2. Combustión	5
2.3. Combustibles	6
2.3.1. Caracterización básica de combustibles	6
2.4. Biomasa	8
2.5. Leña	10
2.5.1. Porcentaje de leña utilizado en Chile	11
2.5.2. Composición química de la madera	13
2.5.3. <i>Eucalyptus globulus</i>	16
2.6. Estufas de leña	17
2.7. Normativa chilena de uso de artefactos que usan leña	20
2.8. Antecedentes de lavado de leña	21

3. Objetivos	30
3.1. Objetivo general.....	30
3.2. Objetivos específicos.....	30
4. Diseño experimental y metodologías	31
4.1. Estufa BOSCA Spirit 380.....	31
4.1.1. Descripción y funcionamiento	31
4.1.2. Especificaciones técnicas de la estufa BOSCA Spirit 380	33
4.2. Túnel de dilución.....	33
4.3. Ensayos de lavado de leña	35
4.3.1. Equipos e instrumentos utilizados	35
4.3.2. Protocolo leño-limpio.	36
4.3.3. Procedimiento experimental del lavado de <i>Eucalyptus globulus</i>	39
4.4. Ensayos de combustión	46
4.4.1. Equipos e instrumentos utilizados	47
4.4.2. Procedimiento experimental combustión	50
4.4.3. Cálculo de factores de emisión	53
5. Resultados	54
5.1. Lavado de leña	54
5.1.1. Medición del contenido de humedad	54
5.1.2. Conductividad, <i>pH</i> y temperatura ensayos leño-limpio	56
5.1.3. Secado	69
5.1.4. Extractos.....	72
5.2. Combustión.....	72
5.2.1. Temperatura en ensayos de combustión.	76
5.2.2. Decaimiento de masa en ensayos de combustión.....	82
5.2.3. Concentración de gases de escape en ensayos de combustión	84
5.2.4. Factores de emisión en ensayos de combustión	88
6. Conclusiones	92

Bibliografía.....	94
ANEXOS.....	96
Anexo 1: [%] de disminución de <i>pH</i> y aumento de conductividad eléctrica diarios durante los primeros 47 días de los ensayos 5 y 7 de combustión.	96
Anexo 2: [%] de disminución de <i>pH</i> y aumento de conductividad eléctrica diarios a partir de los 48 días del ensayo 7 de combustión.	97
Anexo 3: Bitácora de registro de datos y eventos de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.	98
Anexo 4: Tabla resumen de las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas en los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.	112

Índice de Figuras

Figura 1: Comparación del diámetro de un pelo humano y la arena fina de la playa con el MP ₁₀ y MP _{2,5} (MMA, 2016).....	4
Figura 2: Corte transversar que muestra la estructura principal de la leña.....	10
Figura 3: Estructura molecular parcial de la celulosa (Pettersen, 1984).	14
Figura 4: Muestras de viruta de <i>Eucalyptus Globulus</i> (EG), <i>Nothofagus Oblicua</i> (NO) y <i>Pinus Radiata</i> (PR) inmersas en agua destilada.	22
Figura 5: Vista en corte, estufa BOSCA con sistema de doble combustión.....	32
Figura 6: Esquema de túnel de dilución y equipos anexos (Muñoz, 2019).	34
Figura 7: Diagrama del protocolo leño-limpio.	39
Figura 8: Leña de <i>Eucalyptus globulus</i> utilizada en ensayos 1, 2, 3, 4 y 5.	40
Figura 9: Leña de <i>Eucalyptus Globulus</i> utilizada en ensayos 6 y 7.....	40
Figura 10: Medición del contenido de humedad.	40
Figura 11: Medición de masa.	41
Figura 12: Bidón de plástico para el traslado de agua desionizada.	41
Figura 13: Macerador de acero inoxidable.	42
Figura 14: Soluciones de calibración de conductividad y <i>pH</i>	42
Figura 15: Caracterización del agua desionizada. Medición de <i>pH</i> y conductividad.	43
Figura 16: Lavado de leña. A) Ensayo 6; B) Ensayo 7.....	43
Figura 17: C) Medición de <i>pH</i> y conductividad en vaso de precipitado durante la agitación; D) Agitación manual.	44
Figura 18: A) Filtración solución de lavado; B) Traspaso a recipiente de almacenamiento.	44
Figura 19: C) Almacenamiento en recipientes de vidrio; D) Refrigeración de la solución.	45
Figura 20: Secado natural de leña lavada.	45
Figura 21: Montaje de la estufa Spirit 380 y el túnel de dilución en el Laboratorio de Energías Renovables.	46
Figura 22: Configuraciones de admisión de aire primario.	52

Figura 23: Carga de ensayo.	73
Figura 24: Carga de ignición y configuración para el encendido.	73
Figura 25: Configuración de termopares al interior del hogar de combustión.	77
Figura 26: Configuración termopares al exterior del hogar de combustión.	77
Figura 27: Sistema de sujeción de la chimenea de escape.	83

Índice de tablas

Tabla 1: Porcentaje aproximado de celulosa, lignina y pentosano para maderas blandas y duras (Rowell, 2005).	13
Tabla 2: Composición química de la madera de <i>Eucalyptus globulus</i> según Gutmann <i>et al.</i> (1971) y Mansilla <i>et al.</i> (1991).	17
Tabla 3: Límite máximo de emisión de material particulado según potencia (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).	21
Tabla 4: Contenido de minerales y eficiencias del proceso de lavado (Schmidt <i>et al.</i> , 2018).	24
Tabla 5: Factores de emisión de contaminantes gaseosos y particulados (Schmidt <i>et al.</i> , 2018).	26
Tabla 6: Equipos e instrumentos utilizados en la fase experimental. Elaboración propia.	35
Tabla 7: Resumen estadístico de las mediciones del contenido de humedad relativa antes de la etapa de lavado de los leños en los ensayos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.	55
Tabla 8: Resumen del contenido de humedad relativa de los leños lavados pertenecientes a los ensayos 1, 2, 3, 4, 6 y 7 a diferentes tiempos de secado.	70
Tabla 9: Resumen de la masa de los leños lavados pertenecientes a los ensayos 1, 2, 3, 4, 6 y 7 a diferentes tiempos de secado.	71
Tabla 10: Especiación inorgánica de los lavados por ciclo del ensayo 6. Datos analizados por SERVEL.	72
Tabla 11: Resumen de los datos de los ensayos de combustión 9, 10, 11 Y 12.	75
Tabla 12: Temperatura promedio de los 15 puntos de medición en el sistema de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12 durante los primeros 17 minutos.	81

Tabla 13: Resumen de factores de emisión [mg/kg] de CO ₂ , CO, SO ₂ , NO, NO _x y HC.	88
Tabla 14: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados para “carga ensayo”.	98
Tabla 15: Mediciones de velocidad y temperatura de los gases de escape.	99
Tabla 16: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado para los periodos de ignición y ensayo.	100
Tabla 17: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados para “carga ensayo”.	102
Tabla 18: Registro de velocidad y temperatura de los gases de escape.	102
Tabla 19: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado para los periodos de ignición y ensayo.	103
Tabla 20: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados como “carga ensayo”.	105
Tabla 21: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado del periodo de ignición y ensayo.	106
Tabla 22: Contenido de humedad relativa y masa de los leños utilizados como carga de ensayo.	109
Tabla 23: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado del periodo de ignición y ensayo.	110

Índice de gráficos

Gráfico 1: Emisiones al aire por tipo de fuente, 2019 (MMA, 2021).	2
Gráfico 2: Matriz Energética Primaria, año 2019 (Ministerio de Energía, 2021b).	9
Gráfico 3: Matriz Energética Secundaria, año 2019 (Ministerio de Energía, 2021b).	9
Gráfico 4: Distribución del volumen consumido por especie en el sector residencial, al año 2015. (CDT, 2015).	12
Gráfico 5: Consumo de energía por combustible total del país en el sector residencial, 2018 (In-Data SpA & CDT, 2019).	12
Gráfico 6: Artefactos a leña utilizados en el hogar a nivel nacional.	20

Gráfico 7: Registro del monitoreo del <i>pH</i> en función del tiempo de la solución de lavado de virutas de EG, NO, PR y línea base.....	23
Gráfico 8: Registro del monitoreo del conductividad en función del tiempo de la solución de lavado de virutas de EG, NO, PR y línea base.	23
Gráfico 9: Influencia del pretratamiento de lavado en las concentraciones de contaminantes gaseosos y particulados (Schmidt et al., 2020).	25
Gráfico 10: Conductividad en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4.	57
Gráfico 11: <i>pH</i> en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4. El <i>pH</i> se presenta en una escala de 0 a 14.	57
Gráfico 12: <i>pH</i> en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4. El <i>pH</i> se presenta en un rango de 4 a 10 para una mejor visualización.	58
Gráfico 13: Temperatura en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4.	59
Gráfico 14: Conductividad en función del tiempo para la caracterización del agua desionizada.....	59
Gráfico 15: <i>pH</i> en función del tiempo de la caracterización del agua desionizada. El <i>pH</i> se presenta en una escala de 0 a 14.	60
Gráfico 16: <i>pH</i> en función del tiempo para la caracterización del agua desionizada. El <i>pH</i> se presenta en una rango de 5 a 9 para una mejor visualización.	60
Gráfico 17: Conductividad en función del tiempo ensayos 5 y 7. Ensayos completos.	61
Gráfico 18: Conductividad en función del tiempo ensayos 5 y 7. Primeras 96 horas de ensayo.....	62
Gráfico 19: <i>pH</i> en función del tiempo ensayos 5 y 7. Escala de <i>pH</i> de 0 a 14.	63
Gráfico 20: <i>pH</i> en función del tiempo ensayos 5 y 7. El <i>pH</i> se muestra en un rango de 4,0 a 6,5 para una mejor visualización.	64
Gráfico 21: Temperatura en función del tiempo ensayos 5 y 7.	65
Gráfico 22: Conductividad en función del tiempo ensayo 6.....	66
Gráfico 23: <i>pH</i> en función del tiempo ensayo 6.	67
Gráfico 24: <i>pH</i> en función del tiempo ensayo 6. El <i>pH</i> se muestra en un rango de 4 a 8 para una mejor visualización.....	67

Gráfico 25: Temperatura en función del tiempo ensayo 6.....	68
Gráfico 26: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 9.	79
Gráfico 27: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 10.....	79
Gráfico 28: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 11.	80
Gráfico 29: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 12.	80
Gráfico 30: Decaimiento de masa en función del tiempo acumulado de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.	83
Gráfico 31: %O ₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	84
Gráfico 32: %CO ₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.	85
Gráfico 33: Concentraciones de CO en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	86
Gráfico 34: Concentraciones de HC en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	86
Gráfico 35: Concentraciones de NO _x en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	87
Gráfico 36: Concentraciones de NO en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	87
Gráfico 37: Concentraciones de SO ₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.....	88
Gráfico 38: Factores de emisión de CO ₂ [mg/kg].....	89
Gráfico 39: Factores de emisión de CO [mg/kg].	89
Gráfico 40: Factores de emisión de NO _x [mg/kg].....	90
Gráfico 41: Factores de emisión de NO [mg/kg].	90
Gráfico 42: Factores de emisión de SO ₂ [mg/kg].	91
Gráfico 43: Factores de emisión de HC [mg/kg].	91

Glosario

Acrónimos

- MP: Material particulado
- MP₁₀: Material particulado grueso (con diámetro aerodinámico menor o igual a 10[μm])
- MP_{2,5}: Material particulado fino (con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5[μm])
- MP₁: Material particulado fino (con diámetro aerodinámico menor o igual a 1[μm])
- MP_{0,1}: Material particulado ultrafino (con diámetro aerodinámico menor o igual a 0,1[μm])
- CRL: Combustión residencial de leña
- COV: Compuestos orgánicos volátiles
- COVNM: Compuestos orgánicos volátiles no metanos
- COVM: Compuestos orgánicos volátiles metanos
- CDT: Comisión de desarrollo tecnológico
- ISO: International Organization for Standardization
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- DP: Grado de polimerización
- PYME: Pequeña y mediana empresa
- PST: Partículas suspendidas totales
- HAPs: Hidrocarburos aromáticos policíclicos
- BTEX: Benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos
- TOC: Carbono orgánico total.
- n: Número de ciclos.
- GLP: Gas licuado de petróleo.
- GN: Gas natural.
- EC: Ensayos de Combustión.
- PM: Peso molecular.
- V: Volumen.

- T: Temperatura.
- Q: Caudal.
- m_c : Masa de combustible.
- t: Tiempo.

Unidades

- [μm]: Micrómetro
- [cm]: Centímetro
- [ha]: Hectárea
- [kg]: Kilógramo
- [kW]: Kilowatt
- [Tcal]: Teracaloría
- [$^{\circ}\text{C}$]: Grado Celsius
- [h]: Hora
- [m^3]: Metro cúbico
- [m^2]: Metro cuadrado
- [st]: Estéreo
- [kcal]: Kilocaloría
- [GJ]: Giga joule
- [t]: Tonelada
- [“]: Pulgada
- [s]: Segundo
- [Pa]: Pascal
- [mg]: Milígramo
- [ppm]: Partes por millón
- [mL]: Mililitro.

Símbolos

- C: Carbono
- H: Hidrógeno
- O: Oxígeno
- N: Nitrógeno
- S: Azufre
- K: Potasio
- Na: Sodio
- Ca: Calcio
- P: Fósforo
- CO: Monóxido de carbono
- CO₂: Dióxido de carbono
- O₃: Ozono troposférico
- H₂O_(g): Vapor de agua
- N_{2(g)}: Nitrógeno gaseoso
- O_{2(g)}: Oxígeno gaseoso
- NO_x: Óxidos de nitrógeno
- SO₂: Dióxido de azufre
- HC: Hidrocarburos
- NO: Óxido nítrico
- NO₂: Dióxido de nitrógeno
- NO₃: Trióxido de nitrógeno
- N₂O: Óxido nitroso
- N₂O₅: Pentóxido de nitrógeno

Resumen

La calefacción de las viviendas mediante la combustión de leña es una de las tres grandes fuentes de contaminación del aire en Chile, afectando a los seres vivos y al medio ambiente. En la zona sur, entre las regiones de O'Higgins y Aysén el 66% de la población utiliza leña para la calefacción y en su mayoría con un alto contenido de humedad, haciendo el proceso de combustión más ineficiente y contaminante.

El presente trabajo de título en el marco del proyecto FONDEF IDeA 2020 ID20I10319 consiste en investigar de forma experimental la influencia del uso de leña lavada en una estufa residencial de combustión sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos gaseosos (CO_2 , CO , NO_x , SO_2 y HC).

Para la investigación se elaboró un protocolo de lavado de leña certificada optimizado mediante 7 ensayos de lavado de *Eucalyptus globulus* con agua desionizada. En el protocolo de lavado de leña se identificaron 5 etapas: selección de la leña, medición del contenido de humedad, lavado, filtración y secado. Posterior al secado de la leña lavada se realizaron 4 ensayos de combustión en una estufa de doble combustión conectada a un túnel de dilución montado en el Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera de la USM.

En los ensayos de lavado se midió el pH y la conductividad eléctrica de la solución acuosa hasta alcanzar valores constantes de estos para establecer el tiempo de lavado. El tiempo de lavado fue de 97 días, alcanzado un pH de 4.6 [-] y una conductividad de 1267 [$\mu\text{m}/\text{cm}$]. Para acelerar el proceso de lixiviación se optimizó el protocolo para realizarlo en 28 días con 4 ciclos de lavado (renovación de agua desionizada cada 168 horas) obteniendo resultados similares a un lavado extenso de 97 días. Los principales minerales extraídos identificados en la solución de lavado del proceso de lixiviación son en orden decreciente K, P, Na, Mg, N, Ca, Mn, Al y Cr.

En los ensayos de combustión se calcularon los factores de emisión de los gases de escape y se midió el decaimiento de masa, la temperatura en 15 puntos del sistema y las concentraciones de los gases de combustión en el túnel de dilución. Los resultados del decaimiento de masa no fueron concluyentes. El promedio de las temperaturas en función del tiempo fue mayor en el ensayo de leña certificada sin lavar. Los factores de emisión resultaron ser menores en el ensayo de leña certificada sin lavar en comparación con los ensayos de leña lavada para el CO_2 , CO y SO_2 , mientras que para los NO_x y HC los resultados no fueron concluyentes.

Debido a la dificultad en replicar ensayos de combustión por los diferentes parámetros involucrados y a las posibles mediciones erróneas es importante realizar más replicas de los ensayos para poder tener mejor certeza de los resultados.

Abstract

Heating homes through burning firewood is one of the three major sources of air pollution in Chile, affecting living beings and the environment. In the southern area, between the regions of O'Higgins and Aysén, 66% of the population uses firewood for heating and most of it has high moisture content, making the combustion process more inefficient and polluting.

The present degree work in the framework of the FONDEF IDeA 2020 ID20I10319 project consists of experimentally investigating the influence of the use of washed firewood in a residential combustion stove on the emissions of gaseous atmospheric pollutants (CO₂, CO, NO_x, SO₂ and HC).

For the research, an optimized certified firewood washing protocol was developed by means of 7 washing trials of *Eucalyptus globulus* with deionized water. In the firewood washing protocol, 5 stages were identified: firewood selection, moisture content measurement, washing, leakage and drying. After drying the washed firewood, 4 combustion tests were carried out in a double combustion stove connected to a dilution tunnel set up in the Renewable Energies Laboratory of the José Miguel Carrera Campus of the USM.

In the washing tests, the *pH* and electric conductivity of the watery solution were measured until constant values were reached in order to establish the washing time. The washing time was 97 days, reaching a *pH* of 4.6 [-] and a conductivity of 1267 [$\mu\text{m}/\text{cm}$]. To accelerate the leaching process, the protocol was optimized to be carried out in 28 days with 4 washing cycles (renewal of deionized water every 168 hours) obtaining results similar to an extensive washing of 97 days. The main extracted minerals identified in the washing solution of the leaching process are, in decreasing order, K, P, Na, Mg, N, Ca, Mn, Al and Cr.

In the combustion tests, exhaust emission factors were calculated and mass decay, temperature at 15 points in the system and flue gas concentrations in the dilution tunnel were measured. The mass decay results were inconclusive. The average temperatures as a function of time were higher in the unwashed certified firewood test. Emission factors were found to be lower in the unwashed certified firewood trial compared to the washed firewood trials for CO₂, CO and SO₂, while for NO_x and HC the results were inconclusive.

Due to the difficulty in replicating combustion tests because of the different parameters involved and the possible erroneous measurements, it is important to perform more replicates of the tests in order to have better certainty of the results.

1. Introducción

La contaminación atmosférica junto al cambio climático, son algunos de los problemas más grandes que afectan al planeta, dado sus efectos adversos en los seres humanos, animales y el medio ambiente. Por lo que se ha hecho primordial el uso sustentable de los recursos naturales y la innovación tecnológica para utilizar los recursos de forma responsable y eficiente.

Se reconocen tres grandes fuentes de contaminación del aire, estas son, los medios de transporte, las actividades industriales y la calefacción de las viviendas mediante combustión de leña (MMA, 2021).

Una gran parte de la población mundial utiliza la leña como fuente de energía para la calefacción del hogar y cocinar, dada su disponibilidad y accesibilidad, sobre todo en los hogares de menos recurso de los países en desarrollo, donde generalmente se utiliza leña húmeda en fogones abiertos o en estufas antiguas con mal funcionamiento (K.R. Smith, 2006).

En Chile, un 30% de las viviendas son calefaccionadas con leña y en la zona sur, entre las regiones de O'Higgins y Aysén esta cifra asciende a un 66%, incluso superando el 90% entre la Región de Los Ríos y Aysén. En su mayoría, la leña utilizada tiene un alto contenido de humedad, haciendo el proceso de combustión más ineficiente y contaminante (Ministerio de Energía, 2021a).

En el Gráfico 1 se pueden observar las emisiones de contaminantes al aire por tipo de fuente, según datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). De las emisiones nacionales totales del año 2019, la combustión de leña residencial fue la principal emisora de material particulado fino y grueso (65,86% de MP_{2,5} y 63,6% de MP₁₀), mientras que las emisiones de SO₂, CO₂ y NO_x representaron un 0,44%, 8,96% y 7,34% respectivamente (MMA, 2021).

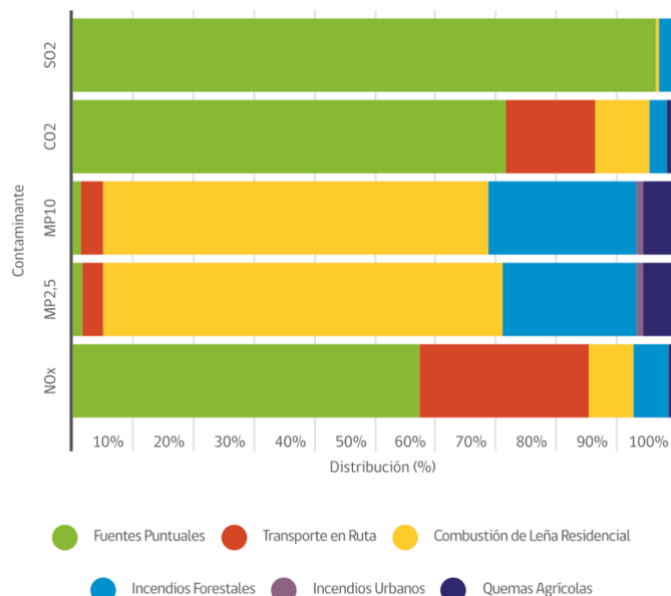


Gráfico 1: Emisiones al aire por tipo de fuente, 2019 (MMA, 2021).

Es por esto, que es necesario implementar nuevas tecnologías e ideas innovadoras para obtener mejores eficiencias de combustión y reducir los contaminantes provenientes de la combustión residencial de leña. El presente trabajo de título consiste en investigar de forma experimental la influencia del uso de leña lavada en una estufa residencial de combustión sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos gaseosos (CO₂, CO, NO_x, SO₂ y HC).

2. Marco teórico

2.1. Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes de la atmósfera consisten en una gran variedad de gases, vapores y partículas, cuya presencia y cantidad afecta a las personas, las plantas, los animales y los materiales. Según sea su origen se pueden clasificar en contaminantes primarios o secundarios (MMA, 2016).

Los contaminantes primarios son aquellos que proceden directamente de las fuentes de emisión, tales como artefactos de calefacción domiciliarios, chimeneas industriales y tubos de escape de automóviles. Ejemplos de éstos son el monóxido de carbono (CO), compuestos nitrogenados (NO_x , NH_3 , N_2O), compuestos azufrados (SO_x , SO_2), material particulado (MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$), hidrocarburos y metales.

Los contaminantes secundarios son aquellos que se originan en el aire a raíz de reacciones químicas que pueden ocurrir entre dos o más contaminantes primarios, o entre contaminantes primarios y elementos propios de la atmósfera. Algunos ejemplos son el ozono troposférico (O_3), hidrocarburos oxidados, aerosoles orgánicos secundarios, sulfatos, nitratos, material particulado secundario, entre otros (MMA, 2016).

2.1.1. Material Particulado (MP)

El material particulado es una mezcla de partículas líquidas y/o sólidas suspendidas en el aire que difieren en tamaño, composición y origen. Este se clasifica principalmente según su tamaño, el cual corresponde al diámetro aerodinámico (MMA, 2016).

El MP respirable comprende las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 [μm], representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen suspendidas en la atmósfera. Estas partículas penetran a lo largo de todo el sistema respiratorio hasta los pulmones, produciendo irritaciones e incidiendo en diversas enfermedades y mientras menor sea su tamaño mayor será el potencial de daño a la salud humana. De acuerdo con la masa y composición, se tienden a dividir en dos grupos principales, Material Particulado

Grueso (MP₁₀), con diámetros entre 2,5 [µm] y 10 [µm]; y Material Particulado Fino (MP_{2,5}), con diámetros menores a 2,5 [µm]. Este último es el contaminante más dañino para la salud y que genera mayores niveles de mortalidad prematura en la población.

En la Figura 1, se puede observar la comparación del diámetro aerodinámico del MP₁₀ y MP_{2,5} respecto a un pelo humano y la arena fina de la playa.

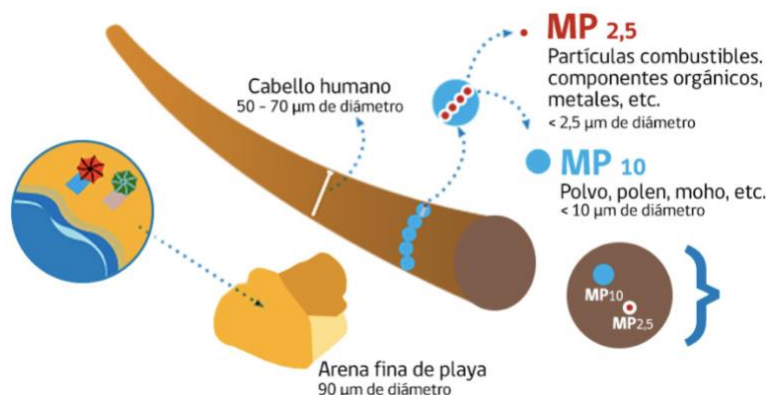


Figura 1: Comparación del diámetro de un pelo humano y la arena fina de la playa con el MP₁₀ y MP_{2,5} (MMA, 2016).

Las principales fuentes de emisiones de MP_{2,5} en Chile, especialmente en las ciudades del centro sur, se deben al uso extensivo de la leña para la calefacción de los hogares. Dentro del listado entregado por la OMS durante el año 2016, la ciudad latinoamericana más contaminada por MP_{2,5} fue Coyhaique, cuyas concentraciones de este contaminante se encuentran sobre la norma anual en un 220% (MMA, 2016).

2.1.2. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas producto de la combustión incompleta de los combustibles al existir una cantidad insuficiente de oxígeno, dando como resultado CO en vez de CO₂. Los vehículos a motor y los procesos industriales son responsables de aproximadamente el 80% de estas emisiones a la atmósfera. Sin embargo, también se produce al interior del hogar por la combustión residencial de leña para calefacción, cocinas, humo de cigarrillo y calefones.

Este gas tiene efectos perjudiciales, ya que altas concentraciones pueden causar cambios fisiológicos y patológicos que pueden llevar a la muerte de un ser humano.

Se han hecho experimentos que han demostrado que el gas no produce efectos dañinos en plantas a concentraciones por debajo de 100 ppm, teniendo en cuenta que rara vez las concentraciones ambientales de este contaminante pueden alcanzar dicho nivel (MMA, 2016).

2.1.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Estos gases se producen durante el quemado de maderas y combustibles fósiles, como gasolina, carbón y gas natural. Entre los óxidos de nitrógeno (NO_x) se incluyen el óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), trióxido de nitrógeno (NO₃), óxido nitroso (N₂O) y pentóxido de nitrógeno (N₂O₅). El sector transporte constituye la fuente principal de emisión de NO_x, siendo los vehículos con motor diésel los mayores contribuidores de estos gases.

Los NO_x son responsables de importantes efectos sobre la salud y el medio ambiente, como problemas respiratorios o daño pulmonar, mayor susceptibilidad a las infecciones, daño celular, irritación ocular y pérdida de las mucosas. El NO₂ puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que puede ser causa de corrosión de las superficies metálicas y detener el crecimiento de plantas (MMA, 2016).

2.2. Combustión

El proceso de combustión se define como una reacción química en la que se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía (Cengel & Boles, 2005). Las reacciones de combustión pueden llevarse a cabo directamente con el oxígeno o bien con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno, llamada comburente, siendo el aire atmosférico el comburente más habitual. Este proceso requiere de una energía de activación, que es el aporte energético que desencadena y permite alcanzar la temperatura de inflamación correspondiente a la temperatura mínima a la cual el combustible puede arder.

La combustión puede clasificarse en completa o incompleta, dependiendo del grado de eficiencia en la oxidación total del combustible. Entre los factores que determinan la eficiencia de combustión se encuentra la disponibilidad de oxígeno, la pureza o

calidad del combustible, el grado de humedad de éste, las temperaturas de combustión, entre otros. La combustión completa ocurre cuando el combustible se quema y transforma íntegramente, en presencia suficiente de oxígeno y en condiciones óptimas, obteniendo como productos de combustión principalmente, energía, dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), nitrógeno gaseoso (N_2) y dióxido de azufre (SO_2). La combustión incompleta ocurre cuando el combustible no se quema totalmente por falta o exceso de oxígeno y por condiciones inadecuadas, obteniendo como productos de combustión, energía, dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua ($\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$), nitrógeno gaseoso ($\text{N}_{2(\text{g})}$) y dióxido de azufre ($\text{SO}_{2(\text{g})}$), además de monóxido de carbono ($\text{CO}_{(\text{g})}$), óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_{\text{x}(\text{g})}$), oxígeno gaseoso ($\text{O}_{2(\text{g})}$), cenizas finas (hollín o partículas $\text{C}_{(\text{s})}$), e hidrocarburos no quemados, entre otros (Cengel & Boles, 2005).

2.3. Combustibles

Los combustibles son sustancias que participan en reacciones exotérmicas y en fenómenos de transferencia de calor y masa, denominadas en términos generales como combustión. En estas reacciones el combustible es oxidado bajo ciertas condiciones termodinámicas con liberación de calor y otras formas energéticas. Estos se pueden clasificar de acuerdo con la fase de su condición de suministro en sólidos, líquidos y gaseosos. Los combustibles sólidos son los más utilizados como fuente primaria de energía para la industrialización en el mundo, lo cual se puede atribuir a su relativa abundancia. Algunos ejemplos son los carbones, coques y petcoke, esquistos de petróleo, (oil-shale), desechos forestales y una amplia gama de combustibles del grupo de la biomasa, de estos los carbones son los combustibles sólidos más utilizados (Rosales, 2019).

2.3.1. Caracterización básica de combustibles

La caracterización de los combustibles se centra en sus propiedades físicas y químicas. Comúnmente se realizan dos tipos de análisis para caracterizar la composición de combustibles: el análisis elemental y el análisis inmediato. Estos análisis se encuentran especificados en normas ISO (Internacional Organization for Standardization) y también ASTM (American Society for Testing and Materials) (Rosales, 2019).

2.3.1.1. Análisis inmediato

El análisis inmediato, también denominado análisis aproximado o análisis físico, entrega una primera idea sobre las características de composición de un combustible, que permiten inferir el comportamiento a esperar durante el proceso de combustión. Consiste en la determinación del contenido de humedad, material volátil, cenizas y en el cálculo de carbono fijo.

▪ Humedad

Corresponde al contenido de agua del combustible. Se distingue la humedad intrínseca y humedad bruta. La humedad intrínseca da lugar a la esencia del combustible, es retenida tenazmente y no puede eliminarse sin que el combustible pierda en parte sus características, tiene una presión de vapor bajo la normal, y un cambio de energía está involucrado en su separación de la sustancia del combustible. La humedad bruta es una humedad adicional, de carácter superficial, que puede removerse por escurrimiento o secado, sin embargo, no existe una línea definida de demarcación entre ambos tipos de humedades y bajo las condiciones ordinarias de secado existe tendencia a que más agua que la asociada con la humedad bruta abandone el material.

Cabe destacar que la humedad disminuye el poder calorífico del combustible, pero aumenta la velocidad de combustión por rompimiento de granos.

▪ Material volátil

El material volátil es aquella porción que, excluyendo el vapor de agua, se desprende en forma de gas cuando el combustible es calentado a una temperatura de 950 ± 20 °C durante 7 minutos. El material volátil es un indicador de la facilidad de ignición y permite establecer criterios de diseño para cámaras de combustión, el suministro de oxidante y la estabilidad de llama. Puede ser tan alto como 70 a 77% en el caso de la madera, o inferior a 10% cuando se trata de carbones antracíticos.

▪ Carbono fijo

El carbono fijo es el residuo combustible que queda después de que se ha extraído el material volátil. Este residuo es una mezcla compleja de hidrocarburos muy ricos en

carbono y representa la parte del combustible que debe ser quemada directamente en estado sólido.

- **Cenizas**

La ASTM define las cenizas como el residuo inorgánico remanente después de que se han consumido las sustancias combustibles.

2.3.1.2. Análisis elemental

El análisis elemental corresponde a las fracciones en masa de los elementos de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S) presentes en el combustible. Se aplican las normas ASTM D 5373 para carbono, hidrógeno y nitrógeno, y ASTM D 4239 para el azufre. Debido a la complejidad para determinar el oxígeno directamente, éste se obtiene por diferencia.

Este análisis es necesario para los cálculos fundamentales de combustión tales como el requerimiento de oxidante, el volumen de gases de escape producidos, entre otros parámetros (Rosales, 2019).

2.4. Biomasa

Se considera biomasa a un grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y deshechos orgánicos, quedando fuera de este concepto los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de éstos (CNE, 2007).

La combustión de biomasa es considerada, según el protocolo de Kyoto, como neutral en emisiones de dióxido de carbono. Esto se debe a que la cantidad de CO₂ emitida durante la quema de un combustible biomásico fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento, formando un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación (Fredes, 2014).

En el año 2019, la matriz energética primaria en Chile fue de 345.647 [Tcal], en la cual los recursos fósiles (petróleo crudo, carbón mineral y gas natural) representaron un

68% del total, destacándose además la participación de un 24% de biomasa (Ministerio de Energía, 2021b), como se muestra en el Gráfico 2.

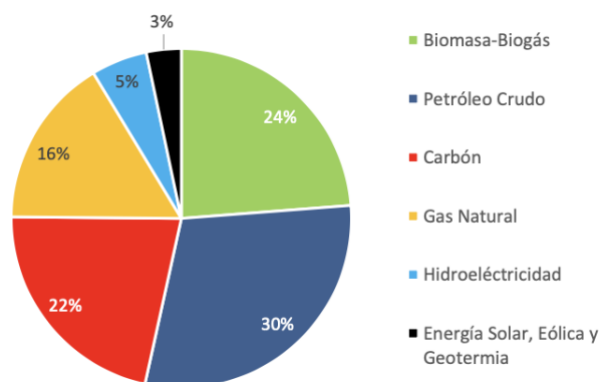


Gráfico 2: Matriz Energética Primaria, año 2019 (Ministerio de Energía, 2021b).

El consumo final de energía (representado en la matriz energética secundaria) en el año 2019 fue de 301.629 [Tcal]. Como se muestra en el Gráfico 3, en porcentajes de participación la biomasa representa el 13% del consumo final, mientras que los derivados del petróleo (57%) y la electricidad (22%) corresponden a los recursos de mayor participación (Ministerio de Energía, 2021b).

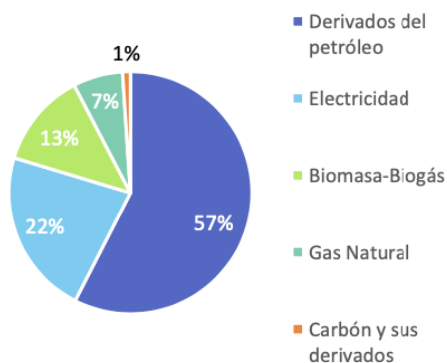


Gráfico 3: Matriz Energética Secundaria, año 2019 (Ministerio de Energía, 2021b).

Para el procedimiento de registro de biomasa en el Balance Nacional de Energía (BNE), la biomasa considerada corresponde al consumo de leña, derivados de la leña (briquetas, pellet, carbón vegetal, despunte de madera), licor negro, residuos orgánicos (líquidos y sólidos) y residuos agrícolas (Ministerio de Energía, 2021b)

2.5. Leña

La leña corresponde a una porción de madera en bruto de troncos, ramas y otras partes de árboles y arbustos, utilizada como combustible sólido. Incluye toda la madera obtenida de los bosques, o de cualquier especie leñosa, tanto forestal como agrícola, que conserva la composición original de la madera y su formato (Fredes, 2014). La estructura principal de la leña se compone de una capa exterior llamada corteza que recubre el árbol protegiéndolo de agentes atmosféricos exteriores; una fina capa de células vivas llamada cámbium que produce células de corteza en el exterior y células de madera en el interior; la albura correspondiente a la madera joven del árbol y que está irrigada por una mayor cantidad de savia; el duramen que corresponde a la madera con dureza y consistencia en donde se acumulan los extractos; y la médula ubicada en la parte central del tronco constituida por células débiles o muertas (Instituto Forestal, 2020). En la Figura 2 se puede observar en un corte transversal la estructura principal de un tronco de leña.

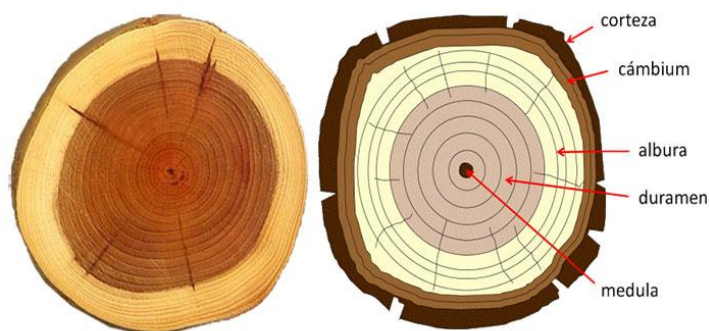


Figura 2: Corte transversal que muestra la estructura principal de la leña.

El proceso productivo tradicional de leña comprende la producción en el bosque, la extracción manual o mecanizada, su trozado y desrame para posteriormente ser fraccionado y almacenado al aire libre, dando inicio al secado, hasta su disposición para ser comercializada. A nivel nacional, la extracción de este recurso de origen nativo está regulada por el Decreto de Ley N° 701 (1974), el cual establece la obligatoriedad de contar con un Plan de Manejo para la intervención de los bosques con el objetivo de fomentar el uso racional del recurso y su ecosistema (Ministerio de Energía, 2014).

El año 2009 se crea la Corporación Nacional de Certificación de Leña con el objetivo de formalizar y regular el mercado, agregar valor al producto, mejorar la rentabilidad y sustentabilidad del manejo forestal, además de disminuir la contaminación del aire a partir del uso de leña con características establecidas. Dicha corporación entrega la certificación como una herramienta de mercado, voluntaria para los productores de leña. Se establece como un requisito fundamental para una leña de buena calidad, que el contenido de humedad de este combustible sea inferior al 25%, puesto que cuanto mayor es el porcentaje de humedad, menor es el poder calorífico, asimismo una elevada porción de humedad predispone una combustión incompleta, quedando gases sin quemar, y a la condensación de vapor de agua y de alquitrán por sobre las paredes del equipo de combustión causando incrustaciones. También, la certificación sugiere que el diámetro de los trozos no superen los 16 [cm] y su largo se encuentre entre los 25 y 30 [cm] (Fredes, 2014).

Según un estudio de medición del consumo nacional de leña, se detectó que el 75% de los hogares consumidores de leña compra todo lo que consumen y la mayoría en lugares no establecidos (CDT, 2015).

2.5.1. Porcentaje de leña utilizado en Chile

En Chile, al año 2017 la superficie cubierta de bosques representa el 23,3% del territorio nacional, con 17.665.354 hectáreas, donde el bosque nativo representa el 81,6% (CONAF, 2022). Existe una gran variedad de especies nativas factibles de usar como leña, las más consumidas son Espino, Roble, Raulí, Coigüe, Lingue, Ulmo, Tepu, Luma, Lenga y Ñirre, siendo la lenga la más abundante. Además de las especies exóticas provenientes de las plantaciones forestales, como las especies de Eucalipto, Pino, Aromo y frutales (Fredes, 2014).

Según el Gráfico 4, las especies de leña más consumidas a nivel nacional corresponden al Eucalipto (24%) y al Roble o Hualle (22%), ambas especies correspondientes a maderas duras, seguidas por el Pino (9%) correspondiente a una madera blanda (CDT, 2015).

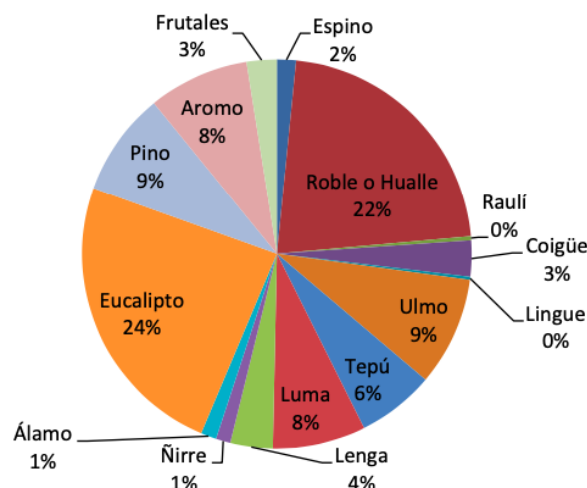


Gráfico 4: Distribución del volumen consumido por especie en el sector residencial, al año 2015. (CDT, 2015).

Cabe destacar que el consumo de leña a nivel nacional corresponde a 11.953.773,9 [m³ st/año], de los cuales el sector residencial consume un 98,47% del total. Siendo un alto índice en comparación al resto de los sectores (PYME, Comercial, Hoteles y Restaurantes, Establecimientos de uso público) (CDT, 2015).

El sector residencial consumió en el año 2018, 50.763 [GWh] de energía, de los cuales un 39,6% del consumo se asigna al uso de leña como energético, seguido con un 31,4% de consumo de gas (GLP+GN) y un 25,7% de electricidad (In-Data SpA & CDT, 2019) como se puede observar en el Gráfico 5.

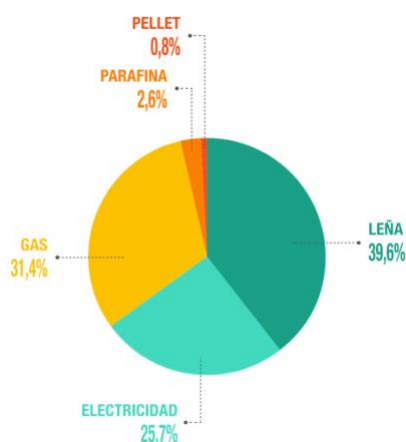


Gráfico 5: Consumo de energía por combustible total del país en el sector residencial, 2018 (In-Data SpA & CDT, 2019).

2.5.2. Composición química de la madera

La madera, en términos químicos se define como un compuesto biopolímero tridimensional, que se compone esencialmente de carbono, hidrógeno y oxígeno, con pequeñas cantidades de extractos orgánicos y minerales que luego de la combustión quedan como cenizas, y trazas de nitrógeno (el cual no reacciona en la combustión) (Rowell, 2005). El carbono, hidrógeno y oxígeno se combinan formando una red interconectada de celulosa, hemicelulosa y lignina, en proporción variable según la especie, la parte del árbol (raíz, tallo o rama), tipo de madera (normal, tensión o compresión), ubicación geográfica, clima y condiciones del suelo. En general, la madera seca tiene una composición elemental de aproximadamente 50% de carbono, 6% de hidrógeno, 44% de oxígeno y trazas de inorgánicos (Rowell, 2005). El análisis químico simple puede distinguir entre maderas duras (angiospermas) y maderas blandas (gimnospermas). En general, las especies de coníferas (maderas blandas) tienen un mayor contenido de celulosa, mayor lignina y menor contenido de pentosano, en comparación con las especies de hoja caduca (maderas duras), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Porcentaje aproximado de celulosa, lignina y pentosano para maderas blandas y duras (Rowell, 2005).

Compuesto	Maderas blandas [%]	Maderas duras [%]
Celulosa	40-45	38-49
Lignina	26-34	23-30
Pentosano	7-14	19-26

El poder calorífico de las especies madereras depende de su densidad y humedad, siendo mayor a medida que la densidad aumenta, pero a su vez demora más el secado. Las especies de la familia de las coníferas (maderas blandas) son las que poseen mayor poder calorífico, asociado a su riqueza de resinas y mayor contenido de lignina, la cual posee cerca de 6.000 [kcal/kg], en comparación con las 4.200 [kcal/kg] entregados por especies frondosas (maderas duras) (Fredes, 2014).

2.5.2.1. Celulosa y hemicelulosa

La porción principal de carbohidratos de la madera está compuesta de polímeros de celulosa y hemicelulosa con pequeñas cantidades de otros polímeros de azúcar como el almidón y la pectina. La combinación de celulosa y las hemicelulosas se llama holocelulosa y generalmente representa un 65-70% del peso seco de la madera. Estos polímeros están compuestos de azúcares simples, principalmente, D-glucosa, D-manosa, D-galactosa, D-xilosa, L-arabinosa, ácido D-glucorónico y cantidades menos de otros azúcares como L-ramnosa y D-fucosa. Estos polímeros son ricos en grupos hidroxilo que son responsables de la absorción de humedad a través de enlaces de hidrógeno (Rowell, 2005).

La celulosa se encuentra en la pared celular de los elementos anatómicos de la madera, siendo las fibras las que contienen la mayor parte de ella. Es un polímero de glucano de unidades de D-glucopiranososa, unidas por enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucosídicos. El número de unidades de glucosa en una molécula de celulosa se conoce como el grado de polimerización (DP). Estas moléculas están orientadas aleatoriamente y tienden a formar enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares. Las cadenas moleculares se empaquetan en capas que se mantienen unidas por las fuerzas de van der Waals (Pettersen, 1984). En la Figura 3 se puede observar la estructura molecular parcial de la celulosa.

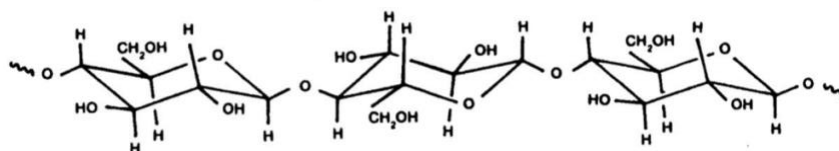


Figura 3: Estructura molecular parcial de la celulosa (Pettersen, 1984).

A medida que aumenta la densidad de empaquetamiento de la celulosa, se forman regiones cristalinas, las cuales pueden abarcar hasta un 65% de la celulosa. La porción restante tiene una densidad de empaquetamiento más baja y se denomina celulosa amorfa.

La celulosa también se puede clasificar en accesible y no accesible. Accesible y no accesible se refiere a la disponibilidad de la celulosa al agua, microorganismos, etc. Estos conceptos son muy importantes en la absorción de humedad, la reducción a pulpa, la modificación química, las extracciones y las interacciones con microorganismos (Rowell, 2005).

Las zonas que presentan elevada cristalinidad son difíciles de penetrar por disolventes y reactivos. Por el contrario, las zonas relativamente más desordenadas (amorfas) son más accesibles y más susceptibles a todas las reacciones químicas (García Hortal, 1993)

Las hemicelulosas son polímeros de polisacáridos con un DP menor que la celulosa, integrados por hexosanos, pentosanos y policerónidos principalmente. Están íntimamente asociadas con la celulosa y contribuyen a los componentes estructurales del árbol (Rowell, 2005). En general las hemicelulosas tienen un peso molecular mucho más bajo que la celulosa (Pettersen, 1984).

2.5.2.2. Lignina

La lignina es una sustancia amorfa que consiste en un conjunto irregular de unidades de fenilpropano, esta no tiene una sola unidad repetitiva como los carbohidratos antes mencionados, sino que consiste en una disposición compleja de unidades fenólicas sustituidas. El contenido de carbono en la lignina es más elevado que en la celulosa y hemicelulosa. Se encuentra principalmente en la lámina media, pero también se halla en la pared de las fibras, siendo la sustancia que las une entre sí (Rowell, 2005).

2.5.2.3. Extractos

Los extractos son un grupo de productos químicos de la pared celular que se pueden extraer con solventes y constituyen del 4 al 10% del peso seco de la madera normal de las especies que crecen en climas templados, y hasta el 20% de la madera de las especies tropicales. Consisten principalmente en grasas, ácidos grasos, alcoholes grasos, fenoles, terpenos, esteroides, ácidos de resina, colofonia, ceras, azúcares simples, proteínas y otros compuestos orgánicos menores. Estos productos químicos existen como monómeros, dímeros y polímeros. Estos extractos cumplen funciones en

el metabolismo de los árboles, como reservas de energía o como parte del mecanismo de defensa contra el ataque microbiano, y contribuyen a las propiedades de la madera, como el color, olor y la resistencia a la descomposición (Pettersen, 1984). En general, las maderas blandas tienen un mayor contenido de extractos que las maderas duras. Algunos azúcares liberados durante la hidrólisis son glucosa, fructosa, galactosa, xilosa, manosa y ramnosa (Rowell, 2005).

2.5.2.4. Contenido inorgánico

El contenido inorgánico de una madera generalmente se conoce como su contenido de cenizas, que es una medida aproximada de las sales minerales y otras materias inorgánicas en la fibra después de la combustión a una temperatura de 575 ± 25 °C. En la mayoría de las maderas el contenido inorgánico es inferior al 0,5%. Esta pequeña cantidad de material inorgánico contiene una amplia variedad de elementos donde el Ca, Mg, y K constituyen el 80% de la ceniza en la madera. Otros elementos presentes son Na, Si, B, Mn, Fe, Mo, Cu, Zn, Ag, Al, Ba, Co, Cr, Ni, Pb, Rb, Sr, Ti, Au, Ga, In, La, Li, Sn, V y Zr (Rowell, 2005).

2.5.3. *Eucalyptus globulus*

El género *Eucalyptus* corresponde botánicamente a la clase Angiospermas y familia Mirtaceae. En particular, el *Eucalyptus globulus* es originario del sudeste de Australia y Tasmania. Esta especie es de gran interés por su rápido crecimiento, resistencia en una amplia gama de climas y suelos. En Chile, se tienen plantaciones desde la V a la X Región. Los árboles adultos de *Eucalyptus globulus* presentan alturas que pueden variar entre los 45 y 60 [m] y diámetros que fluctúan entre 0,9 y 1,5 [m] (Vita, 1990). Estos árboles poseen corteza rugosa y persistente en la parte baja, y en la parte alta se desprende en largas tiras dejando una superficie lisa de color gris azulado. La madera es de color café amarillento claro, textura gruesa, con anillos de crecimiento bastante diferenciados, de gran dureza y pesada. Su peso específico promedio es de 689 [kg/m³] (INFOR, 1986).

En comparación con muchas otras especies, la madera de *Eucalyptus* tiene un alto contenido de extraíbles, que varía considerablemente según la especie. La cantidad de

extraíbles fenólicos aumenta desde la médula hacia el exterior en el duramen, y disminuye en la albura. El mismo patrón de distribución se encuentra en todo el árbol, aún cuando los contenidos de extraíbles son menores en la parte superior (Hillis, 1978).

Gutmann *et al.* (1971) realizaron estudios de caracterización química de *Eucalyptus globulus* en aserrín procedente de varios árboles individuales crecidos en Chile. Por otra parte, Mansilla *et al.* (1991) analizaron muestras de *Eucalyptus globulus* provenientes de individuos con edades entre 10 y 25 años y de troncos sin resina ni acumulación de nudos. Los valores de la composición química de ambos estudios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición química de la madera de *Eucalyptus globulus* según Gutmann *et al.* (1971) y Mansilla *et al.* (1991).

Estudio	Extraíbles (%)	Lignina (%)	Holocelulosa (%)	Celulosa (%)
Gutmann <i>et al.</i> (1971)	4,2	23,2	73,5	41,2
Mansilla <i>et al.</i> (1991)	5,1	20,0	76,5	43,3

Valores calculados en base a peso seco.

El poder calorífico superior de la madera de *Eucalyptus globulus* según el estudio de Mansilla *et al.* (1991) corresponde a 18,97 [MJ/kg] y en estudios más actuales se tienen valores de 18,1 [MJ/kg] en árboles de 3 años de edad (Cabrera, 2019) y 18,98 [MJ/kg] (Villablanca, 2022).

2.6. Estufas de leña

La estufa de leña es un aparato de combustión cerrado, que permite quemar leña y es usada para la calefacción de recintos, pero también existen modelos que permiten cocinar o calentar alimentos, estos últimos son muy utilizados en la zona sur de Chile. Las diferencias con una chimenea son que esta última se encuentra incorporada en la residencia, los materiales utilizados para su construcción son de albañilería y son de combustión abierta, es decir, no tienen tapa o puerta, por lo que las estufas son consideradas más seguras y eficientes que las chimeneas (Bruno Vettraino, Maddalena Carlino, n.d.).

El funcionamiento básico de las estufas a leña consiste en un proceso de combustión mediante la quema del combustible en una cámara de combustión, en este proceso se emite liberación de calor, el cual es transferido hacia el ambiente mediante convección y radiación térmica. Los gases de combustión pasan a través de los conductos que lo expulsan al exterior y las cenizas quedan depositadas en el quemador. El mecanismo de distribución del aire puede ser mediante convección natural o más rápidamente mediante convección forzada, utilizando electro-ventiladores (Bruno Vettraino, Maddalena Carlino, n.d.).

La combustión de pellets emite menos del 10% de los contaminantes que emite un calefactor de leña tradicional dado que en las estufas de pellets se produce una combustión más completa, las cuales alcanzan una eficiencia del 95% en la quema del combustible (Ministerio del Medio Ambiente, 2015), mientras que la estufa de leña tradicional tiene una eficiencia de combustión que fluctúa entre 15% y 75% dependiendo del diseño del artefacto, manipulación y antigüedad (Ministerio de Energía, 2015).

Las ventajas de las estufas a leña en comparación a las estufas de pellet o de gas son que para el caso de las estufas a leña:

- La energía en forma de calor es más potente y se mantiene por más tiempo.
- Produce una sensación mas agradable o acogedora.
- La leña es un combustible económico.
- Algunos tipos de estufas de leña permiten la cocción de alimentos en la misma.

Mientras que las desventajas son las siguientes:

- Requieren de un lugar para almacenar la leña.
- No es automática en su encendido ni programable.
- Necesitan de una salida extractora de humos y buena ventilación.
- Generan residuos combustibles (cenizas) los cuales hay que limpiar periódicamente.

Existen diversos tipos de estufas de leña las cuales tienen en común el combustible, estos se pueden clasificar según su material de construcción o según diversos modelos que existen.

Se distinguen tres tipos de estufas a leña con distintas características según su material de construcción, estas son:

- Estufas de leña de fundición: Están fabricadas en su totalidad de hierro de fundición por lo que son muy resistentes y duraderas. Se tardan en producir calor pero este se mantiene por un largo tiempo.
- Estufas de leña de acero: Se caracterizan por calentar el ambiente rápidamente aunque este calor no permanece por tanto tiempo como en el caso de las estufas de fundición. Dentro de este tipo de sistemas de calefacción están las estufas de leña de acero de doble combustión.
- Estufas de leña de acero con interior refractario: Estas estufas están construidas en su interior con un material refractario capaz de soportar mayores temperaturas, este material refleja la radiación emitida elevando la temperatura y produciendo más calor. Además el calor se conserva eficazmente.

A continuación se mencionan los tipos de estufas de leña según su diseño:

- Estufas de leña de combustión simple: Estas estufas cuentan con una cámara de combustión y sellos de aire regulables. El sistema de combustión simple produce una combustión incompleta, debido a que los gases no se queman en su totalidad, generando altos niveles de monóxido de carbono y material particulado, cuya presencia es letal para los seres humanos, además la fracción más pesada de estos gases (creosota, alquitranes) se condensan y depositan sobre paredes frías del conducto de humo, donde al acumularse, pueden arder ocasionalmente al avivarse el fuego, recalentando los conductos. Por otra parte la mala combustión es motivo de un bajo rendimiento térmico, que hace necesario utilizar grandes cantidades de leña, causando deforestación e impidiendo el uso de forma sustentable. Por este motivo estas estufas son poco utilizadas.

- Estufas de leña de doble combustión: En este tipo de estufas es similar a la anterior, pero posee una segunda cámara de combustión usualmente en la parte superior, donde se inyecta aire provocando una segunda combustión de los gases no quemados en la combustión primaria. Con este sistema se reducen las emisiones y aumenta el rendimiento térmico.
- Estufas de leña panadero: Estas estufas ofrecen la posibilidad de poder cocinar alimento mientras emite calor, son muy utilizadas en la zona sur del país.

En el Gráfico 4 se observa que el artefacto a leña más utilizado para la calefacción en los hogares del país es la estufa a leña de cámara doble (51,6%), seguido por la cocina a leña (16,7%). Los motivos por los cuales los hogares utilizan la leña como energético radican principalmente en la sensación de que la leña calienta más y que es un combustible económico (CDT, 2015).

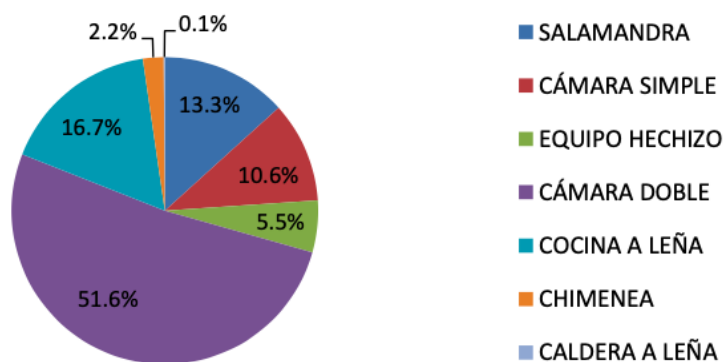


Gráfico 6: Artefactos a leña utilizados en el hogar a nivel nacional.

2.7. Normativa chilena de uso de artefactos que usan leña

El año 2011 el Ministerio del Medio Ambiente crea el Decreto Supremo 39 que establece la Norma “emisión de material particulado, para los artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y pellet de madera”.

Esta norma se aplica a los calefactores nuevos, instalados a partir del año 2014. Entendiendo para efectos de esta Norma un calefactor como un artefacto que combustiona leña o pellet de madera, fabricado, construido o armado en el país o en el extranjero, que tiene una potencia térmica nominal menor o igual a 25 [kW], de alimentación manual o automática, de combustión cerrada, provisto de un ducto para

la evacuación de gases al exterior, destinado a la calefacción en el espacio que se instala y su alrededor.

En la Tabla 3 se tienen los límites máximos de emisión de material particulado con los que deben cumplir los calefactores según norma (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

Tabla 3: Límite máximo de emisión de material particulado según potencia (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

Potencia Térmica Nominal [kW]	Emisión de MP [g/h]
Menor o igual a 8	2,5
Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5
Mayor a 14 y menor o igual a 25	4,5

La medición de las emisiones de material particulado en los artefactos nuevos se deberá efectuar mediante el Método CH-5G “Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución”.

Los procedimientos de ensayo y acondicionamiento del combustible se deberán efectuar mediante el método CH-28 “Determinación de material particulado y certificación y auditoría de calefactores a leña”.

2.8. Antecedentes de lavado de leña

La leña se ha convertido en un combustible importante para la generación de calor doméstico, pero su combustión es una fuente de material particulado, principalmente de partículas finas (MP_{2,5}) y gases producto de la combustión incompleta como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles no metanos (COVNM), como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos (denominados como BTEX), trimetilbenceno, fenoles, aldehídos y cetonas.

Dentro de las técnicas que se desarrollan para reducir los contaminantes de la combustión de madera se distinguen las soluciones que se centran en la calidad del

combustible y en la concepción de estufas, por otro lado, están las soluciones que se centran en el post-tratamiento de los humos utilizando filtros electrostáticos, filtros catalíticos o ciclones.

En los últimos años se ha estudiado el lavado de madera como técnica para mejorar la calidad del combustible, ya que el proceso de lixiviación afecta la composición bioquímica de la madera, particularmente la proporción de extractos y minerales (Rowell, 2005).

En la tesis doctoral denominada “Determinación de trazadores moleculares, cocientes de concentración y factores de emisión para contaminantes seleccionados generados por la combustión de leña utilizando una cámara de combustión controlada 3CE” (Guerrero, 2017) se realizaron lavados de muestras de viruta de las especies *Eucalyptus Globulus* (EG), *Nothofagus Oblicua* (NO) y *Pinus Radiata* (PR) para humidificar la leña a un 25% de humedad y realizar ensayos de combustión en una cámara de combustión controlada 3CE para determinar factores de emisión de material particulado fino. El procedimiento de lavado consistió en la inmersión de 10 [g] de muestra de viruta en 70 [mL] de agua destilada en un vaso precipitado (ver Figura 4) manteniendo por cinco días a temperatura ambiente y sin agitación. Durante el proceso de lavado se monitoreó el *pH* (Gráfico 7) y la conductividad eléctrica (Gráfico 8).

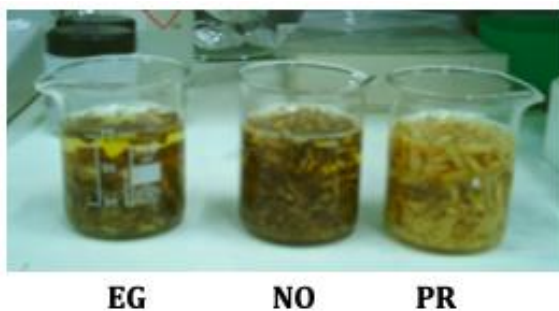


Figura 4: Muestras de viruta de *Eucalyptus Globulus* (EG), *Nothofagus Oblicua* (NO) y *Pinus Radiata* (PR) inmersas en agua destilada.

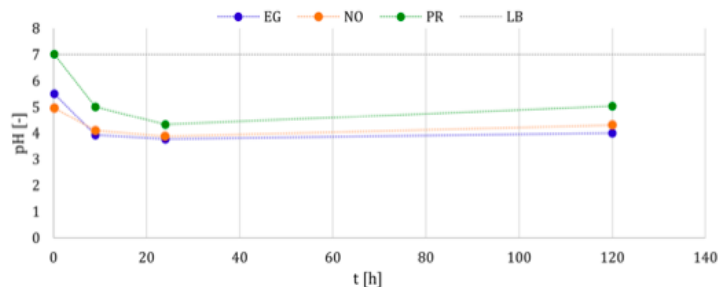


Gráfico 7: Registro del monitoreo del pH en función del tiempo de la solución de lavado de virutas de EG, NO, PR y línea base.

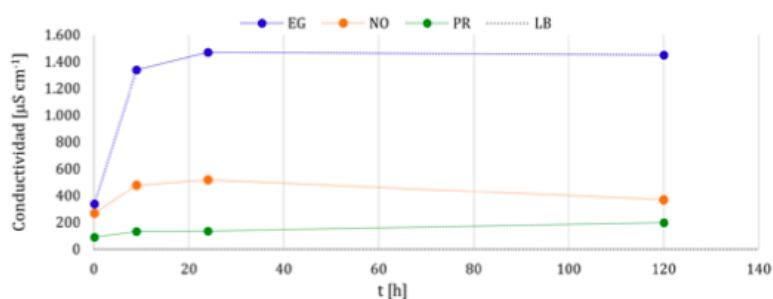


Gráfico 8: Registro del monitoreo del conductividad en función del tiempo de la solución de lavado de virutas de EG, NO, PR y línea base.

Los lavados de virutas de madera con agua destilada a temperatura ambiente lograron la acidificación y el aumento de la conductividad de todas las soluciones en comparación a la solución base. Lo que indica que es posible que el lavado de madera elimine compuestos químicos orgánicos e inorgánicos contenidos en la estructura de esta.

Según estudios realizados por Schmidt y colaboradores (Schmidt et al., 2018), la pérdida de extractos disminuye las emisiones de compuestos orgánicos volátiles durante la descomposición térmica de la biomasa, especialmente durante la fase de pirolisis y la pérdida de minerales permite que se reduzcan las emisiones de partículas. En esta investigación se estudió la influencia de la lixiviación de madera y su posterior combustión, el cual se realizó a escala de laboratorio con biomásas crudas (sin lavar) y lavadas, las que fueron combustionadas en una estufa de pellets con potencia nominal de 6,3 [kW] para observar variaciones de emisiones gaseosas y de partículas emitidas

por la desmineralización de la madera. En el procedimiento se lavaron astillas de madera con agua destilada a temperatura ambiente para luego convertirlas en pellets. Los pellets crudos y lavados se quemaron para tres diferentes especies (Roble, Haya, y Abeto) y el estudio se centró en las emisiones de Partículas Suspensas Totales (PST) y gases de combustión como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, y compuestos orgánicos volátiles totales. También se midieron en los humos los hidrocarburos aromáticos policíclicos, aldehídos y trazadores de madera como compuestos de fenoles o azúcares.

Los resultados obtenidos por Schmidt y colaboradores, indican que el proceso de lixiviación no afecta significativamente las fracciones de peso de los valores elementales C, H, O, N, S. Respecto a la desmineralización de la madera, se obtuvieron eficiencias de eliminación muy alta de algunos minerales como el potasio (K), sodio (Na), fósforo (P) y azufre (S), como se puede apreciar en la Tabla 4, en donde se muestran los valores de los 10 minerales principales contenidos en la materia prima, con sus respectivas masas y porcentaje de extracción en el proceso de lavado. Cabe destacar que la presencia de potasio favorece en gran medida la gasificación de la celulosa con un aumento de compuestos gaseosos como H₂, CO, CO₂ y HAP.

Tabla 4: Contenido de minerales y eficiencias del proceso de lavado (Schmidt et al., 2018).

	Abeto crudo [mg/kg]	Eficiencia lavado de abato	Haya cruda [mg/kg]	Eficiencia lavado de Haya	Roble crudo [mg/kg]	Eficiencia lavado de Roble
Al	3	-10%	7	-5%	27	-1%
Ca	893	-10%	2264	-4%	3247	-1%
Fe	6	-5%	8	-5%	25	-3%
K	279	±100%	1223	-90%	991	-70%
Mg	68	-20%	386	-13%	136	-5%
Na	< 5	-80%	< 5	-60%	6	±100%
P	18	-59%	47	±100%	68	-36%
S	50	-58%	115	-58%	158	-7%
Si	683	-1%	194	-36%	47	-28%
Zn	5	-14%	2	-4%	2	-3%
Extracción global	/	-22%	/	-34%	/	-17%

Del lavado de madera resultó una disminución notoria de las concentraciones de CO y PST respecto a la madera cruda para las tres especies de madera. En el Gráfico 9 se puede observar que la disminución de contaminantes tanto gaseosos como particulados disminuye hasta un 50% en el caso del Roble y se alcanzan valores cercanos a las concentraciones de pellets estandarizados (DIN+). En los resultados también se observa que las concentraciones de CO medidas en la combustión de especies frondosas crudas (Roble y Haya) son más altas que en las especies coníferas (DIN+ y Abeto crudo).

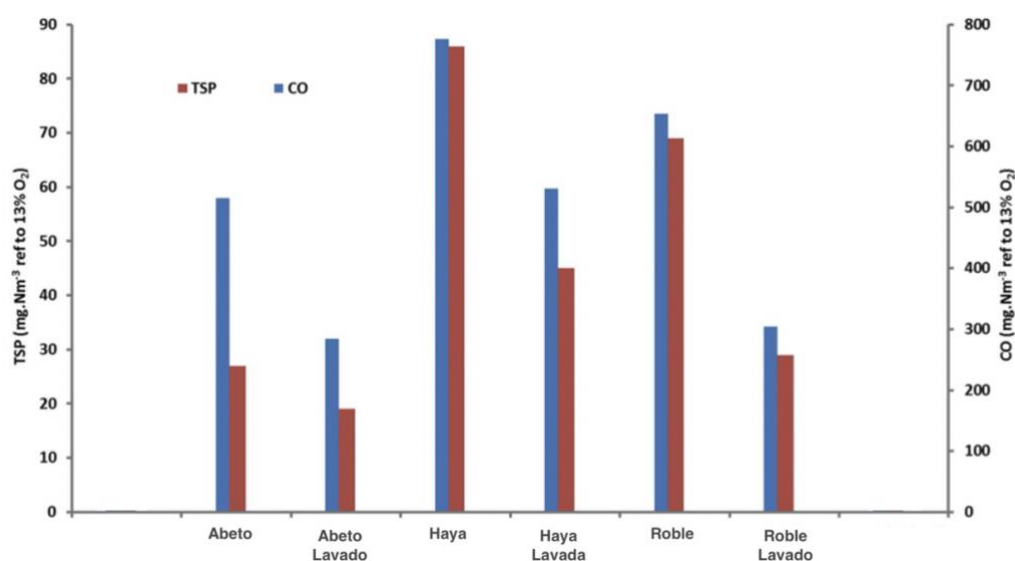


Gráfico 9: Influencia del pretratamiento de lavado en las concentraciones de contaminantes gaseosos y particulados (Schmidt et al., 2020).

La Tabla 5 detalla la influencia del proceso de lavado sobre los factores de emisión de CO, NO_x, PST, COVNM y COV, en donde se observa que el pretratamiento de lavado tiene como consecuencia una disminución en los factores de emisión para cada uno de los ítems. El proceso de lavado conduce a una disminución de los factores de emisión de CO en el escape que oscila entre 31% y 51% para las especies estudiadas. También se puede observar que el factor de emisión de partículas suspendidas totales (PST o TSP) con el pretratamiento disminuye prácticamente a la mitad para el caso de los pellets fabricados con madera dura (Haya y Roble) y los valores de las emisiones en general son 2 veces mas altos que los pellets fabricados con madera blanda (Abeto). Los COV totales se detectaron solo para gránulos de Abeto en bruto, donde los

COVNM dominan en gran manera en el gas de combustión y las concentraciones de COVM estaban por debajo del límite de cuantificación.

Tabla 5: Factores de emisión de contaminantes gaseosos y particulados (Schmidt et al., 2018).

[mg·MJ ⁻¹]	Abeto	Abeto lavado	Haya	Haya lavada	Roble	Roble lavado
CO	330 ± 15	225 ± 22	520 ± 16	396 ± 22	461 ± 18	239 ± 17
NO_x	73 ± 25	70 ± 34	130 ± 26	120 ± 35	147 ± 30	136 ± 28
TSP	17 ± 2	14 ± 2	57 ± 8	34 ± 3	49 ± 1	23 ± 1
NMVOC (eq. CH₄)	13 ± 7	<LOQ ^a	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
VOC (eq. CH₄)	14 ± 7	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ

^a Se determinó LOQ y es igual a 8 [mg·MJ⁻¹].

Las moléculas de benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos y trimetilbenceno (BTEX) se analizaron en la fase gaseosa y los compuestos principales son en orden creciente, tolueno, benceno y trimetilbenceno, que representan del 88% al 96% del total de moléculas detectadas en los gránulos de las tres especies de madera. Sobre el efecto del lavado de la biomasa, las observaciones no son significativas para todas las biomásas. En el caso del Roble se presenta una disminución del 60% del factor de emisión del total de BTEX tras el lavado de biomasa y para el caso del Abeto lavado los valores aumentaron en un 250%, mientras que los gránulos de Haya lavada son equivalentes a los de Haya cruda en términos de emisiones de BTEX.

El lavado de biomasa muestra un impacto benéfico en las emisiones de fenol en comparación con la quema de biomasa cruda gracias a la solubilidad de los compuestos fenólicos en agua. Las emisiones totales de fenol, que son la suma de las emisiones de fase líquida, gaseosa y sólida, pueden reducirse en un 91%, 76% y 34% para gránulos lavados de Abeto, Roble y Haya respectivamente.

Diez aldehídos desde el número de carbono C1 (formaldehído) hasta el carbono C8 (p-tolualdehído) y dos cetonas (acetona y butanona) fueron analizadas en la fase gaseosa. En términos de emisiones totales de aldehídos, la combustión de maderas lavadas muestra un aumento del 33% y 60% para el Abeto y el Roble respectivamente, mientras que las emisiones de gránulos de Haya lavada disminuyen en un 9%.

Respecto a los factores de emisión de los HAP se presenta una disminución de un 64% para el caso del Abeto lavado, pero para el caso del Haya y el Roble lavado no se tiene un efecto significativo. Además, se calculó un factor tóxico equivalente para medir el impacto en la salud humana y este factor en los HAP adsorbidos y gaseosos se reduce considerablemente en un 96% para el caso del Abeto lavado, y un aumento de 163% para el caso del Roble lavado, lo cual se debe a un cambio en la distribución de los anillos aromáticos.

De acuerdo con los resultados, el impacto del lavado de madera parece ser positivo con respecto a la emisión total de partículas $MP_{2,5}$. Sin embargo, se modifica la distribución de tamaños en las fracciones de MP_1 , favoreciendo la emisión de partículas ultrafinas ($MP_{0,1}$) en el escape. Cabe destacar que para el caso del Abeto lavado las partículas ultrafinas alcanzan un 70,5% del total de $MP_{2,5}$.

También se midió la fracción de masa total de partículas suspendidas por gravimetría, y las pérdidas de masa observadas después del proceso de lavado fueron cercanas al 38%, 32% y 25% para Roble, Haya y Abeto respectivamente. Las pérdidas de masa consideran las pérdidas de minerales por la disolución en el proceso de lavado y pérdidas de cenizas.

En otra investigación relacionada con el estudio antes mencionado se estudió la influencia del lavado del aserrín (biomasa bruta molida a 4 [mm]) de tres especies de madera (Haya, Abeto y Roble) en composiciones minerales y orgánicas (Schmidt et al., 2020). Se realizó un protocolo de lavado en donde las relaciones de masa de agua y biomasa se tomaron de acuerdo con el protocolo estándar de lixiviación EN 12457/2 (UNE-EN, 2003). Se mezclaron 50 [g] en base seca de madera con un volumen de 500 [mL] de agua desmineralizada y la mezcla se colocó bajo agitación por 24 [h], que corresponde a un ciclo de lavado, en una mesa de lixiviación Stuart modelo SSL1 a 145 [rpm]. Para cada ciclo de lavado la mezcla se filtró. Y se añadieron los 500 [mL] de agua desmineralizada para el siguiente lavado. Esta operación se repitió durante 96 [h] para realizar un total de 4 ciclos de lavado. Se realizaron pruebas para analizar la influencia en la granulometría del aserrín, así como la influencia de la temperatura del

agua de lavado, esta última se llevó a cabo a 5, 20 y 30 [°C] para simular condiciones de clima frío, templado y cálido. El contenido de lavado estaba sumergido en un recipiente de circulación de agua conectado a un baño termostático serie LabWorks Modelo 2000. Durante el lavado de madera, se monitoreó la conductividad eléctrica del agua y los compuestos inorgánicos para seguir la desmineralización de la madera, y también se midió el total de compuestos orgánicos extraídos durante el protocolo de lavado.

Los resultados del estudio muestran una alta remoción de compuestos inorgánicos durante el proceso de lavado y cuanto más finamente fue dividida la madera más rápida y mayor fue la desmineralización, lo que indica que la superficie de contacto juega un rol importante. Para las tres especies de madera la conductividad en el proceso de lavado presenta una curva potencial la cual aumenta de forma gradual sin alcanzar un equilibrio en los primeros dos ciclos de lavado, la conductividad máxima alcanzada para cada ciclo de lavado es menor que la anterior, y tras las 96 [h] la eliminación de los componentes iónicos solubles de las maderas se logra casi en su totalidad, lo que confirma el agotamiento gradual de minerales de la biomasa. Para cada cambio de agua, la conductividad inicial de la solución nunca fue igual a cero porque el agua desionizada también contribuye a una parte de la conductividad, incluso si es pequeña. Cualquiera que sea la especie de madera, el potasio es el metal más soluble extraído durante el proceso de lavado, seguido de sodio, magnesio, fósforo y azufre. El aluminio, calcio, hierro y sílice se extraen menos (Schmidt et al., 2020).

La temperatura es otra variable importante ya que su aumento favorece los intercambios iónicos entre el agua y las maderas sólidas porque aumenta la solubilidad de las especies iónicas. Se realizó una medición continua de la conductividad del agua de lavado de biomasa bruta a 4 [mm] para caracterizar la influencia de la temperatura de lavado y para las tres especies de madera se obtuvo un aumento de la conductividad al aumentar la temperatura, en el caso del Roble este efecto fue más notorio. También se observó que la temperatura favorece la extracción de minerales principalmente en el primer ciclo de lavado, luego el proceso de extracción decae y la conductividad converge a valores similares durante los últimos dos ciclos.

El lavado de biomasa también promueve la extracción de algunos compuestos orgánicos de la madera, incluidas las moléculas de peso molecular ligero, como los extractos. Para estimar estas pérdidas, se analizó el agua de lavado para determinar el contenido de carbono orgánico total (TOC) extraído, y para los cuatro ciclos de lavado los resultados muestran que es posible extraer entre 1% y 2% en masa de carbono orgánico y los valores máximos de TOC se obtuvieron en los gránulos de Roble a 20°C y 30°C, cuya madera tiene más extractos, en su mayoría taninos (Schmidt et al., 2020).

En general los resultados de los estudios mencionados muestran que la naturaleza de la biomasa juega un papel importante tanto en el lavado como en la combustión y parece claro que el pretratamiento de lavado extrae minerales y compuestos orgánicos contenidos en la madera.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

En el marco del proyecto de innovación FONDEF IDeA 2020 código ID20I10319, denominado “Innovador prototipo de calefacción residencial integrado al pretratamiento de lavado de leña para la mitigación de contaminantes atmosféricos: Carbono negro, material particulado y gases de combustión”, el objetivo general del presente trabajo es:

Investigar la influencia del uso de la leña lavada en una estufa residencial de combustión sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos (CO_2 , CO, NO_x , SO_2 y HC).

3.2. Objetivos específicos

1. Implementar un sistema de recolección de emisiones para la dilución de contaminantes generados por la combustión residencial de leña.
2. Desarrollar un protocolo de lavado de *Eucalyptus globulus*. En el cual se debe medir *pH* y conductividad eléctrica de las soluciones del lavado de leña.
3. Caracterizar las emisiones de contaminantes atmosféricos bajo diferentes condiciones de ensayos de combustión en leña certificada-estufa convencional y leña lavada-estufa convencional.
4. Evaluar la influencia del uso de leña lavada en una estufa residencial de combustión sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos.

4. Diseño experimental y metodologías

El presente trabajo de título se ejecuta en una primera instancia en el Laboratorio de Termofluidos ubicado en la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) en enero del 2020, en donde se implementa el túnel de dilución para la recolección de emisiones. Luego, a partir de abril del 2021 en el contexto de la pandemia COVID-19 se desarrolla por teletrabajo en el marco del proyecto FONDEF ID20I10319, con la colaboración de las empresas Bosca Chile S.A y Bosques del Norte S.A. A partir de agosto del 2021 fue desarrollado en forma presencial en las dependencias del Laboratorio de Energías Renovables de la Sede José Miguel Carrera, en donde se dispuso de un laboratorio para el lavado de leña y se instaló el túnel de dilución para la realización de los ensayos de combustión.

4.1. Estufa BOSCA Spirit 380

Para los ensayos de combustión se utilizó la estufa BOSCA Spirit 380 la cual se describe a continuación.

4.1.1. Descripción y funcionamiento

La estufa Spirit 380, es una estufa de combustión lenta de doble combustión, es decir, se generan dos zonas de combustión, una primera zona en la base de la estufa donde se encuentra el quemador y es depositada la leña, y la segunda zona se produce por sobre la leña. En la parte superior de la estufa se tienen dos entradas de aire, las cuales son regulables, además de un templador, pieza desmontable encargada de precalentar y dirigir el aire por sobre los troncos, y una chimenea de escape que permite la salida de los humos. El interior de la estufa se encuentra cubierto por ladrillos de vermiculita y en la parte frontal por la ventanilla de la puerta tiene deflectores que direccionan el aire primario y permiten que el vidrio no se ensucie con los gases de la combustión. En la Figura 5 se muestra una vista en corte donde se aprecia el flujo de aire durante la combustión.



Figura 5: Vista en corte, estufa BOSCA con sistema de doble combustión.

Una vez encendida la leña se genera la primera zona de combustión en la base de la estufa, y para que esta ocurra, el comburente (en este caso el aire primario) entra a temperatura ambiente mediante un mecanismo regulable y al ser más denso que el aire caliente dentro de la cámara, por convección fluye por la parte frontal de la estufa a través de los deflectores y por la primera zona de combustión, aumentando su temperatura y disminuyendo su densidad. Luego el aire al ser menos denso sube por la parte trasera de la cámara de combustión hacia la segunda zona de combustión donde se forma la denominada “cortina de fuego” que permite la quema homogénea de los trozos de leña. El aire secundario, es precalentado en el templador y dirigido hacia la segunda zona de combustión, además se tiene una inyección de aire secundario por unos pequeños orificios de las paredes laterales, encargados de generar turbulencia por sobre los troncos, donde se quema el material volátil que no fue quemado en la primera zona, y se logra una combustión más completa. Este proceso se conoce como post combustión, permite que los gases de escape sean invisibles y se reduzca el material particulado. Finalmente los gases suben por la chimenea de escape y salen al ambiente, generando vacío dentro de la cámara, lo que permite la entrada de aire, produciendo una corriente y que se repita el ciclo de combustión.

4.1.2. Especificaciones técnicas de la estufa BOSCA Spirit 380

Las especificaciones técnicas de la estufa BOSCA Spirit 380 se detallan a continuación (BOSCA Chile S.A, 2017).

- Potencia: 10,8 [kW] = 9.888 [Kcal/h]
- Rango de calefacción = Hasta 180 [m²] *Estimación promedio para viviendas en Chile.
- Peso: 87,2 [kg]
- Ancho: 54,6 [cm]
- Alto: 84,2 [cm]
- Profundidad: 56,6 [cm]
- Diámetro de cañón: 6" (15,2 [cm])
- Tiraje: 12 [Pa]
- Caudal másico de los humos: 118.3 [g/s]
- Rendimiento: 72%

4.2. Túnel de dilución

El túnel de dilución implementado es un sistema de recolección de emisiones para la dilución de contaminantes generados por la combustión residencial de leña, como gases contaminantes y material particulado. Este utiliza un muestreo de flujo constante (isocinético) que permite la homogeneidad de los contaminantes dentro del túnel. El sistema consta de un conjunto de equipos y elementos conectados entre sí, estos son: una campana de acero inoxidable de 0,3 [m] en su extremo ancho, alineada a la chimenea de escape del calefactor de leña, la que está constituida por un ducto con diferentes secciones (0,15 y 0,23 [m]); ductos de acero inoxidable de 0,15 [m] de diámetro, 2 codos de acero inoxidable de 90° y 0,15 [m] de diámetro, un tubo con deflectores para mezclar los gases y partículas, un soplador que mantiene un flujo constante dentro del túnel de dilución y los expulsa a la atmósfera, y un tablero de control con regulador de flujo y medidores de presión marca TOTEN. El esquema del sistema de dilución se observa en la Figura 6.

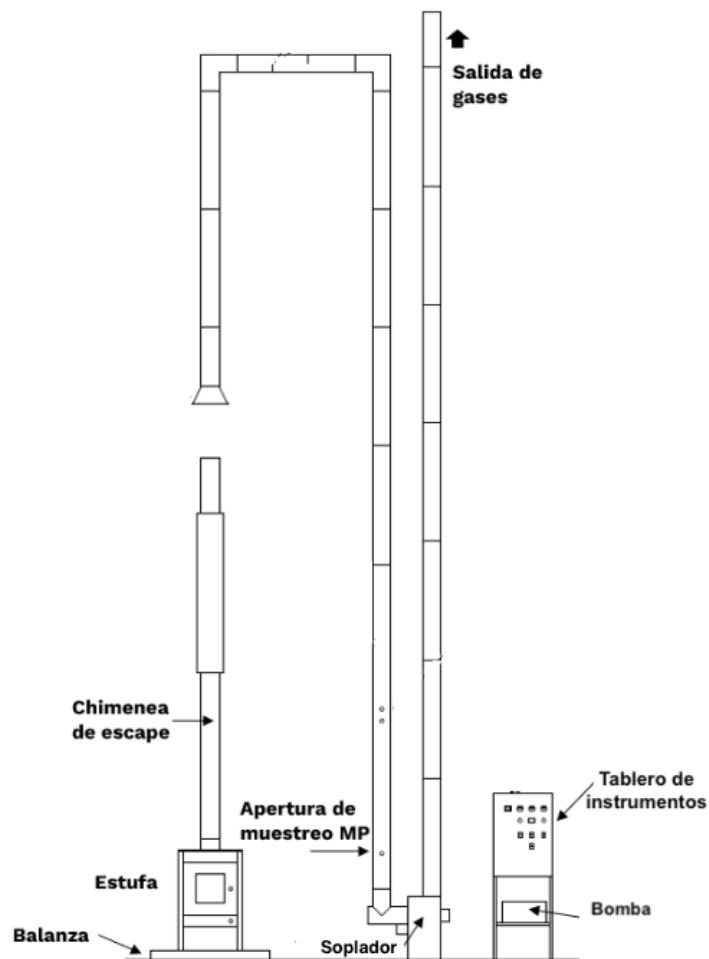


Figura 6: Esquema de túnel de dilución y equipos anexos (Muñoz, 2019).

El sistema se encontraba previamente en el laboratorio y taller de prototipos de la empresa Ingeniería de Combustión Bosca Chile S.A. El apoyo en la instalación en el Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM consistió en realizar un chequeo de las piezas que componen el túnel de dilución y de su limpieza (los ductos se limpiaron con etanol). En esta instancia se mandaron a fabricar dos piezas, correspondientes a la campana y al tubo con deflectores del túnel de dilución. Debido a la pandemia COVID-19, el sistema de dilución se trasladó al Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la sede José Miguel Carrera.

4.3. Ensayos de lavado de leña

4.3.1. Equipos e instrumentos utilizados

En la Tabla 6 se detallan los equipos e instrumentos utilizados para las mediciones realizadas en los ensayos de lavado de leña (leño-limpio).

Tabla 6: Equipos e instrumentos utilizados en la fase experimental. Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Características	Ilustración
Balanza digital	Balanza digital	▪ Marca: Electronic. ▪ Modelo: SF- 400. ▪ Rango: 0 – 7000 [g]. ▪ Resolución: 1 [g].	
Xilohigrómetro	Medidor de humedad relativa de madera y materiales de construcción. Con medidor de humedad y temperatura del aire.	▪ Marca: Testo. ▪ Modelo: Testo 606-2. <u>Medición de humedad en materiales</u> ▪ Rango: 7,0 hasta 54,8% en peso. En maderas. ▪ Exactitud: $\pm 1\%$. ▪ Resolución: 0,1%. <u>Medición de humedad-capacitivo</u> ▪ Rango: 0 a 100% HR. ▪ Exactitud: $\pm 2,5\%$ HR (5 hasta 95% HR). ▪ Resolución: 0,1 % HR. <u>Medición de temperatura</u> ▪ Rango NTC: -10 a 50 °C. ▪ Exactitud: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. ▪ Resolución: 0,1°C.	

Potenciómetro	Medidores multiparamétricos portátiles de calidad de agua. Con medidor de <i>pH</i> y conductividad.	▪ Marca: Laqua. ▪ Modelo: PC-110. <u><i>Electrodo de pH</i></u> ▪ Rango: -2,00 a 16,00 <i>pH</i>. ▪ Resolución: 0,01 <i>pH</i>. ▪ Precisión: $\pm 0,01$ <i>pH</i>. ▪ Puntos de calibración: 2. <u><i>Electrodo de conductividad</i></u> ▪ Rango: 0,001 [$\mu\text{S/cm}$] a 2000,0 [mS/cm]. ▪ Resolución: 0,05% del rango completo. ▪ Precisión: $\pm 0,6\%$ del rango completo; $\pm 1,5$ del rango completo $> 18,0$ [mS/cm]. ▪ Puntos de calibración: 2.	
----------------------	--	--	---

4.3.2. Protocolo leño-limpio.

El protocolo de leño-limpio corresponde a los pasos que se deben seguir para realizar un correcto lavado de leña certificada, el cual fue optimizado para *Eucalyptus globulus*, correspondiente a la especie más utilizada en la calefacción residencial del país. La finalidad de este protocolo es obtener como producto leña lavada (extrayendo compuestos orgánicos e inorgánicos) con un contenido de humedad inferior a un 25% para luego evaluar su uso en la combustión residencial de leña.

Previo a desarrollar el protocolo de leño-limpio se realizó un estudio de los antecedentes del lavado de madera, los cuales se presentaron en el marco teórico del presente trabajo, luego se desarrolló un protocolo preliminar de leño-limpio donde se identificaron las etapas del proceso y el procedimiento general de cada una de ellas, el cual fue optimizado mediante 7 ensayos de lavado de leña de *Eucalyptus globulus* con

agua desionizada. Las etapas del protocolo leño-limpio son: selección de la leña, medición del contenido de humedad, lavado, filtración y secado.

Etapas 1: Selección de la leña

En la primera etapa se define el formato de la leña para lavar y sus características. El formato escogido corresponde a leña trozada, dado que es el formato de leña más utilizado en la combustión residencial. Los trozos de leña deben tener características semejantes entre sí, con dimensiones entre 25 y 30 [cm] de largo, no más de 16 [cm] de diámetro y con corteza en al menos una de sus caras. Además, se debe trabajar con leña que cumpla con los estándares de certificación.

Etapas 2: Medición contenido de humedad.

En esta etapa se debe medir el contenido de humedad relativa de la leña con un xilohigrómetro, realizando al menos una medición en cada una de las caras de los trozos de leña. Los leños deben contener menos de un 25 % de humedad relativa para cumplir con la normativa NCh 2907/2005. También se debe registrar la medición de masa de los leños con una balanza electrónica.

Etapas 3: Lavado

La etapa de lavado consiste en la lixiviación de la leña con agua contenida en un macerador con capacidad de 100 [L]. Para este proceso se definen las condiciones de lavado como el tipo de agua, relación sólido-líquido, tiempo de lavado, número de ciclos, temperatura de lavado y tipo de agitación. Las condiciones escogidas son las siguientes:

- Tipo de agua: agua desionizada.
- Relación sólido-líquido: 1:4.
- Tiempo de lavado: tipo necesario hasta alcanzar valores constantes en *pH* y conductividad.
- Número de ciclos de lavado: ensayos de 1 ciclo y n ciclos.
- Temperatura de lavado: temperatura ambiente.
- Tipo de extracción: maceración con agitación manual (por 2 [min] cada 24 [h]).

Para el lavado se utiliza como solvente agua desionizada (de esta forma se comienza el lavado con una conductividad casi nula). La relación sólido-líquido 1:4 permite que los leños queden completamente sumergidos. La duración del lavado dependerá del tiempo necesario hasta alcanzar valores constantes de *pH* y conductividad eléctrica. Para el caso del lavado por etapas se deben realizar renovaciones de agua hasta alcanzar valores semejantes de *pH* y conductividad entre el penúltimo ciclo (n-1) y el último ciclo (n), además la sumatoria de la conductividad final de cada ciclo de lavado debe ser similar a la conductividad final de un lavado extendido de 1 ciclo. Para una mejor homogenización de los compuestos se debe realizar una maceración con agitación manual por 2 minutos cada 24 horas.

Durante el proceso de lavado se debe hacer un monitoreo del *pH*, conductividad eléctrica y temperatura del agua de lavado de forma continua para conocer el comportamiento de estos parámetros durante la lixiviación.

Etapas 4: Filtración.

En esta etapa se debe separar la parte sólida (leña) de la líquida (agua desionizada más los contenidos orgánicos e inorgánicos extraídos) para la posterior caracterización química de la solución de lavado. Para esto abre la válvula inferior del macerador y se extrae la solución, la cual se debe almacenar en un refrigerador idealmente en recipientes de vidrio para evitar reacciones químicas, que se ven favorecidas con una mayor temperatura. Por otro lado, la leña lavada se debe caracterizar, midiendo el porcentaje de humedad y la masa para compararla con las condiciones iniciales.

Etapas 5: Secado.

La etapa de secado corresponde a la última etapa de proceso. La leña lavada se debe deshumidificar hasta alcanzar aproximadamente su condición de humedad inicial (humedad relativa inferior a un 25%). Para esto, la leña lavada se debe secar de forma natural en un lugar protegido de la humedad y posibles lluvias.

En el diagrama de la Figura 7 se presenta un resumen de las cinco etapas del protocolo de leño-limpio.

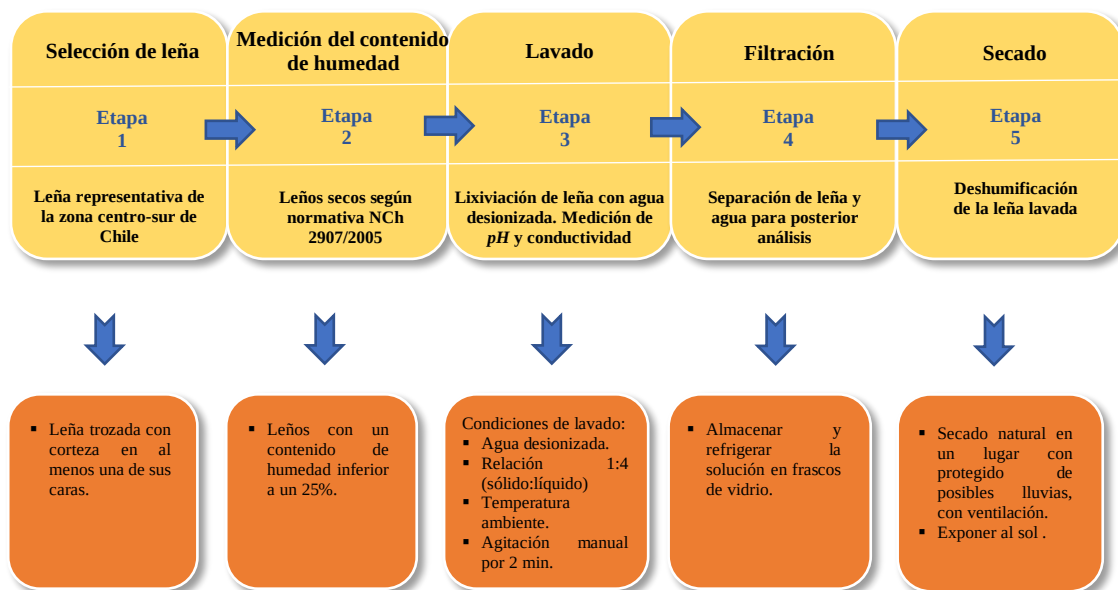


Figura 7: Diagrama del protocolo leño-limpio.

4.3.3. Procedimiento experimental del lavado de *Eucalyptus globulus*.

Para la optimización del protocolo de leño limpio se realizaron 7 ensayos de lavado de leña de *Eucalyptus globulus*.

Etapa 1: Selección de la leña

En los primeros 5 ensayos (E1, E2, E3, E4 y E5) se utilizó leña trozada correspondiente a un mismo lote cuyos troncos con diámetros de 16 [cm] aproximadamente estaban partidos por la mitad como se puede observar en la Figura 8, mientras que los ensayos 6 y 7 (E6 y E7) se realizaron con leña trozada provenientes de Bosques del Norte S.A con diámetro aproximado de 7 [cm] y un largo de 30 [cm] cuyas características se pueden observar en la Figura 9. Por sus diámetros se puede notar que la leña proporcionada por Bosques del Norte S.A correspondía a ejemplares más jóvenes que la leña de los primeros 5 ensayos.

Los trozos de leña se identifican con una numeración para el seguimiento de la masa y humedad.



Figura 8: Leña de *Eucalyptus globulus* utilizada en ensayos 1, 2, 3, 4 y 5.



Figura 9: Leña de *Eucalyptus Globulus* utilizada en ensayos 6 y 7.

Etapas 2: Medición contenido de humedad

En esta etapa se mide el contenido de humedad relativa de la leña en cada una de sus caras, con un xilohigrómetro marca Testo (Figura 10).



Figura 10: Medición del contenido de humedad.

Además, se registra la masa inicial de los leños para comparar la masa luego del lavado de estos. El aumento de masa en los leños representa la masa de agua adsorbida en las paredes de las células y absorbida en las cavidades. Para la medición se utiliza una balanza digital (Figura 11).



Figura 11: Medición de masa.

Etapas 3: Lavado

El agua desionizada para el lavado se traslada desde el Laboratorio de Química de la Casa Central USM en Valparaíso al Laboratorio de Energías Renovables de la Sede Viña del Mar, utilizando bidones de plástico de 25 [L] (Figura 12).



Figura 12: Bidón de plástico para el traslado de agua desionizada.

Para la lixiviación se utiliza un macerador de acero inoxidable con capacidad de 100 [L], con tapa y una válvula en la parte inferior (Figura 13).



Figura 13: Macerador de acero inoxidable.

En los ensayos de lavado E1, E2, E3, E4 y E5 se utilizaron 20 [L] de agua desionizada y 5 [kg] de leña, y en los ensayos E6 y E7 se utilizaron 60 [L] de agua desionizada y 15 [kg] de leña, lo que representa una relación sólido-líquido 1:4.

Para la medición de pH y conductividad eléctrica del agua se utiliza un potenciómetro multiparamétrico. Para cada ensayo los electrodos se deben calibrar. El electrodo de pH se calibra con dos puntos (4,01 pH y 7,01 pH). El electrodo de conductividad se calibra con un punto (12880 [$\mu m/cm$]) en los ensayos E1, E2, E3, E4 y E5, y con dos puntos (12880 [$\mu m/cm$] y 15 [$\mu m/cm$]) en los ensayos E6 y E7. Las soluciones de calibración de pH y conductividad se pueden ver en la Figura 14.



Figura 14: Soluciones de calibración de conductividad y pH .

Una vez incorporada el agua desionizada en el macerador se caracteriza hasta alcanzar valores constantes de pH y conductividad (Figura 15).

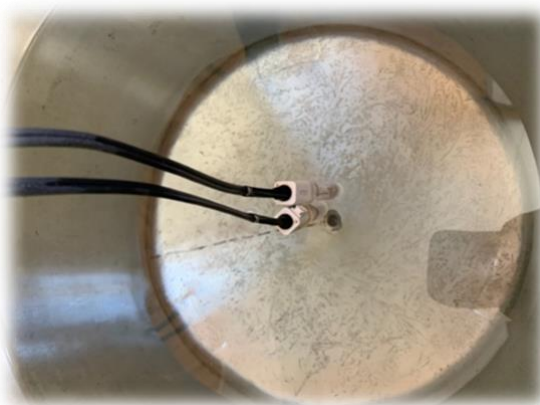


Figura 15: Caracterización del agua desionizada. Medición de pH y conductividad.

A continuación, se incorporan los leños en el macerador y comienza el lavado de leña (Figura 16). Durante los ensayos el macerador se mantiene tapado y el potenciómetro toma mediciones de pH y conductividad cada 6 minutos.



Figura 16: Lavado de leña. A) Ensayo 6; B) Ensayo 7.

Se realizan agitaciones manuales por 2 minutos cada 24 [h], durante este tiempo los electrodos se dejan en un vaso de precipitado con la misma solución de lavado para evitar golpearlos durante las agitaciones (Figura 17).

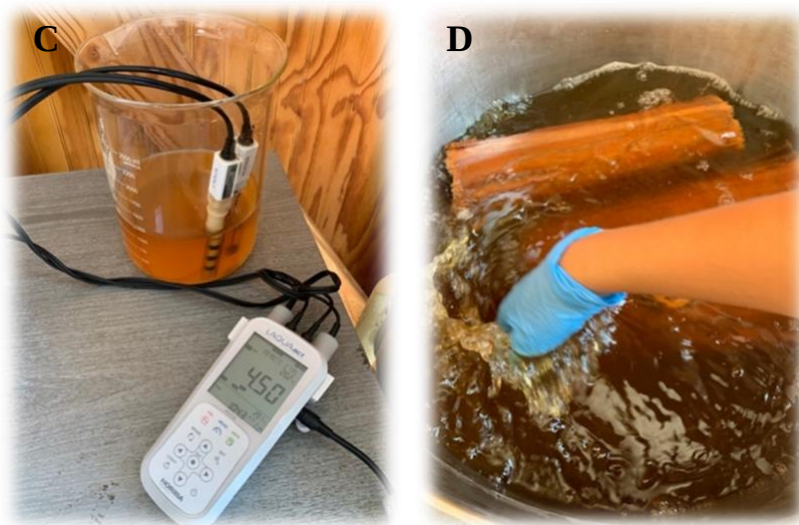


Figura 17: C) Medición de *pH* y conductividad en vaso de precipitado durante la agitación; D) Agitación manual.

Etap 4: Filtración

Se abre la válvula inferior del macerador y se extraen 15 [L] de la solución de lavado en recipientes de plástico y 4 [L] en recipientes de vidrio. Posteriormente se refrigeran. El proceso se puede observar en la Figura 18 y Figura 19.

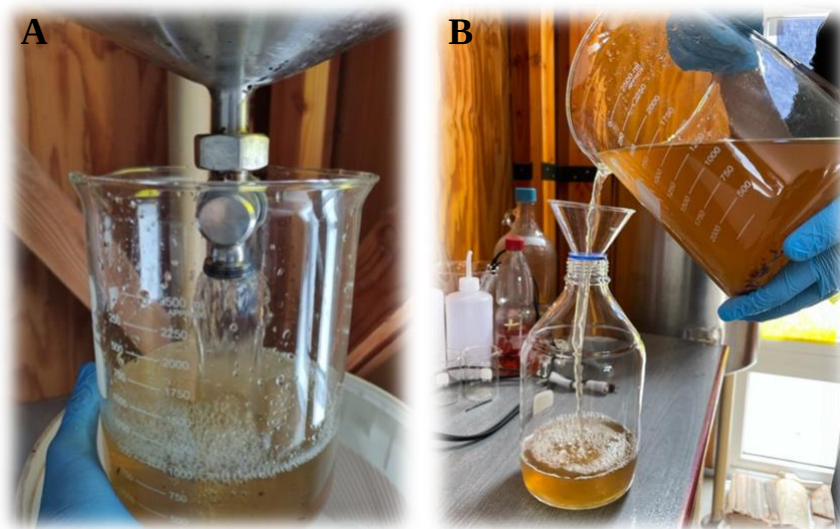


Figura 18: A) Filtración solución de lavado; B) Traspaso a recipiente de almacenamiento.

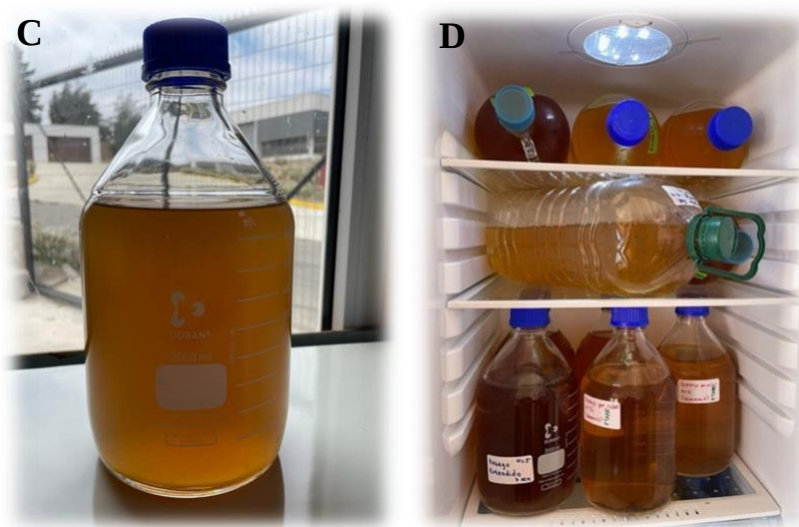


Figura 19: C) Almacenamiento en recipientes de vidrio; D) Refrigeración de la solución.

Luego, la leña lavada se caracteriza, midiendo el porcentaje de humedad relativa y la masa para compararla con las condiciones iniciales.

Etapas 5: Secado

La leña lavada se dispone cerca de la ventana del laboratorio como se puede observar en la Figura 20, de esta forma queda expuesta al sol y con ventilación durante algunas horas del día y protegida de la lluvia.



Figura 20: Secado natural de leña lavada.

4.4. Ensayos de combustión

Los ensayos de combustión se realizan en la estufa de calefacción residencial modelo Spirit 380 descrita en el punto 4.1. La estufa se monta con la ayuda de una plataforma (gata hidráulica para carga y descarga) sobre la balanza de plataforma para la medición de masa la cual cuenta con un programa computacional para el registro de datos cada 1 [s], a la estufa se acoplan termopares tipo K para medir la temperatura del sistema. Los ductos de la chimenea de la estufa se alinean a la campana del túnel de dilución para la dilución de los gases de escape y material particulado. El montaje se puede observar en la Figura 21. En la parte inferior del túnel de dilución se encuentran los orificios para montar la sonda del equipo analizador de gases de combustión (TESTO 350 XL), equipado con sensores de gas (CO , CO_2 , H_2 , NO_x , NO , SO_2 , O_2 y HC).

Para la caracterización de las emisiones de contaminantes atmosféricos gaseosos se realiza un ensayo de combustión con leña certificada y tres ensayos de combustión con leña lavada.



Figura 21: Montaje de la estufa Spirit 380 y el túnel de dilución en el Laboratorio de Energías Renovables.

4.4.1. Equipos e instrumentos utilizados

Nombre	Descripción	Características	Ilustración
Analizador de gases	Equipo analizador de gases de combustión. Equipado con sensores de gas (CO, CO ₂ , H ₂ , NO _x , NO, SO ₂ , O ₂ y HC).	▪ Marca: Testo. ▪ Modelo: Testo 350 XL. ▪ Temperatura de funcionamiento: -5 hasta 45 [°C]. ▪ Presión máx. PdC: 50 [mbar]. ▪ Depresión máx. PdC: -300 [mbar]. <u>Presión absoluta</u> ▪ Rango: 600 hasta 1150 [hPa]. ▪ Exactitud: ±10 [hPa]. ▪ Resolución: 1 [hPa]. <u>Medición de O₂</u> ▪ Rango: 0 hasta 25 % Vol. ▪ Exactitud: ±0,8% del f.e (0 hasta 25%) ▪ Resolución: 0,01% Vol. (0 hasta 25% Vol.) <u>Medición de CO (con compensación de H₂)</u> ▪ Rango: 0 hasta 10000 [ppm]. ▪ Exactitud: ±5% del v.m. (200 hasta 2000 [ppm]); ±10% del v.m. (2001 hasta 10000 [ppm]); ±10 [ppm] (0 hasta 199 [ppm]) ▪ Resolución: 1 [ppm]. <u>Opción medición de CO bajo</u> ▪ Rango: 0 hasta 500 [ppm]. ▪ Exactitud: ±5% del v.m (40 hasta 500 [ppm]); ±2 [ppm] (0 hasta 39.9 [ppm]) ▪ Resolución: 0,1 [ppm].	

		<u>Medición NO</u> ▪ Rango: 0 hasta 4000 [ppm]. ▪ Exactitud: ± 5 % del v.m. (100 hasta +1999 [ppm]); ± 10 % del v.m. (2000 hasta +4000 [ppm]); ± 5 [ppm] (0 hasta +99 [ppm]) ▪ Resolución: 1 [ppm]. <u>NO bajo en gases de escape</u> ▪ Rango: 0 hasta 300 [ppm]. ▪ Exactitud: $\pm 5\%$ del v.m (40 hasta 300 [ppm]); ± 2 [ppm] (0 hasta 39,9 [ppm]) ▪ Resolución: $\pm 0,1$ [ppm]. <u>Medición de NO₂</u> ▪ Rango: 0 hasta 500 [ppm]. ▪ Exactitud: $\pm 5\%$ del v.m (100 hasta 500 [ppm]); ± 5 [ppm] (0 hasta 99,9 [ppm]). ▪ Resolución: 0,1 [ppm]. <u>Medición de SO₂</u> ▪ Rango: 0 hasta 5000 [ppm]. ▪ Exactitud: ± 5 % del v.m. (100 hasta 2000 [ppm]); ± 10 % del v.m. (2001 hasta +5000 [ppm]); ± 5 [ppm] (0 hasta +99 [ppm]) ▪ Resolución: 1 [ppm]. <u>Medición CO₂ (infrarojos).</u> ▪ Rango: 0 hasta 50% Vol. ▪ Exactitud: $\pm 0,3$ % Vol. + 1 % del v.m. (0 hasta 25 % Vol.); $\pm 0,5$ % Vol. + 1,5 % del v.m. (>25 hasta 50 % Vol.) ▪ Resolución: 0,01 % Vol. (0 hasta 25 % Vol.); 0,1 % Vol. (> 25 % Vol.).	
--	--	---	--

Balanza de plataforma	Balanza de plataforma digital.	▪ Marca: KERN. ▪ Modelo: 300K5DL. ▪ Capacidad: 300 [kg]. ▪ Resolución: 10,00 [g].	
Adquisidor de datos	Módulo adquisidor de datos.	▪ Marca: OMEGA. ▪ Modelo: OMB-DAQ-56. ▪ Cuenta con 10 entradas diferenciales y 20 entradas individuales (los termopares solo están disponibles para entradas diferenciales). ▪ Rango de temperatura para termopar tipo K: de -200 a 1200 [°C].	
Expansión del adquisidor de datos	Módulo de expansión adquisidor de datos	▪ Marca: OMEGA. ▪ Modelo: OMB-PDQ2. ▪ Cuenta con 20 entradas diferenciales y 40 entradas individuales. ▪ Rango de temperatura para termopar tipo K: de -200 a 1200 [°C].	
Balanza digital	Balanza digital	▪ Marca: Electronic. ▪ Modelo: SF- 400. ▪ Rango: 0 – 7000 [g]. ▪ Resolución: 1 [g].	
Xilohigrómetro	Medidor de humedad relativa de madera y materiales de construcción. Con medidor de humedad y	▪ Marca: Testo. ▪ Modelo: 606-2. ▪ <u>Medición de humedad en materiales</u> ▪ Rango: 7,0 hasta 54,8% en peso. En maderas. ▪ Exactitud: ±1%. ▪ Resolución: 0,1%.	

	temperatura del aire.	<u>Medición de humedad- capacitivo</u> ▪ Rango: 0 a 100% HR. ▪ Exactitud: $\pm 2,5$ % HR (5 hasta 95% HR). ▪ Resolución: 0,1 % HR. <u>Medición de temperatura</u> ▪ Rango NTC: -10 a 50 [°C]. ▪ Exactitud: $\pm 0,5$ [°C]. ▪ Resolución: 0,1[°C].	
--	--------------------------	---	--

4.4.2. Procedimiento experimental combustión

Protocolo quemas con analizador de gases TESTO 350.

Previo a la ignición:

1. Encender computador para registro de datos. Mantener computador energizado a corriente con cargador.
2. Conectar adquirentes de datos a puertos USB, verificar la correcta conexión con el equipo (indicador led verde intenso) e iniciar software asociado ("Personal Daq View" para OMEGA DAQ-56). Para el correcto almacenamiento de datos, crear carpetas según protocolo almacenado en carpeta FONDEF en el PC.
3. Verificar la correcta conexión de termopares e iniciar el registro de datos.
4. Iniciar registro de bitácora con los parámetros de operación del ensayo y posteriores eventos en los tiempos correspondientes.
5. Montar sonda de gases para biomasa TESTO 350 (sonda con pre-filtro + filtros de condensado color amarillo).
6. Energizar caja analizadora TESTO 350.
7. Encender TESTO 350.
8. Diagnosticar sensores.
9. Configurar parámetros de medición:
Tipo de combustible: biomasa

Método de medición: PdC (sólo gases de combustión).

Dilución: x1

10. Conectar a computador vía USB.
11. Iniciar Software “Easy Emission” y comenzar registro en condiciones ambientales (línea base, previo al ingreso de la sonda al punto de muestreo en ducto).

Procedimiento período ignición:

Objetivo: Generar cama de brasas para ensayo.

12. Encender la balanza previo montaje de la estufa sobre ésta.
13. Acoplar ducto de escape de gases al collarín de la estufa.
14. Montar la estufa sobre la balanza, desplazando la gata hidráulica hasta que la estufa esté en contacto con la plataforma de pesaje.
15. Una vez montada la estufa con ducto de escape de gases, registrar masa de conjunto.
16. Cargar la estufa con el combustible. Definir con anterioridad carga de ignición y carga de ensayo.

Carga de ensayo	1,9 a 2,2 [kg]
Carga de ignición	1,5 a 1,8 [kg]
Criterio fin de ignición, término de ensayo Carga remanente = 20 - 25% de la carga de ensayo	0,38 a 0,55 [kg]

17. La carga de ignición corresponderá entre el 60% y 90% de la carga de ensayo.
18. Comprobar y registrar % de humedad de la leña para la carga de ensayo.
19. Encender el ventilador del túnel de dilución mediante el panel de control y dejarlo en máxima potencia. Ocupar solo la posición L1 del panel.
20. Comenzar registro de masas en software.

21. Para encendido se establece un tiempo de entrada de aire primario máxima (posición E, encendido), luego de de 2-3 minutos mantener la entrada de aire en el mínimo (posición -, mínimo).
22. Se deja consumir la carga de leña hasta que la masa llegue a un 20-25% de la carga de ensayo o hasta que se apague la llama, se comienza a atizar la leña y formar la cama de brasas.

En la Figura 22 se observan las configuraciones de admisión de aire primario.

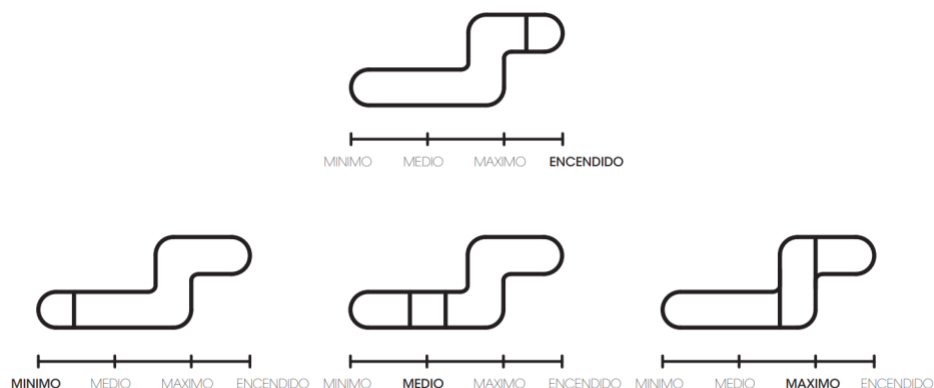


Figura 22: Configuraciones de admisión de aire primario.

Período de ensayo:

Objetivo: Obtener datos de concentración de gases ppm a través del analizador TESTO 350.

1. Dejar configurado con anterioridad el TESTO 350 (tipo de combustible, calibración gases, dilución, etc.) y comprobar su funcionamiento en ambiente.
2. Registrar el tiempo y cantidad de masa que registra la balanza al alcanzar criterio de 20 - 25% de la carga de ensayo o apagado de llama. Ingresar la carga del ensayo (sin tarar la balanza) al estar con la cama de brasas previamente atizadas.
3. Comenzar con la medición de gases de manera continua hasta finalizar ensayo. No ocupar dilución en el TESTO 350.

4. Registrar en bitácora el tiempo en que ocurra algún evento. Por ejemplo, apertura de puerta, variación en el ingreso de aire, modificación de algún parámetro, algún error en los registros de temperatura, gases o masa, etc.
5. Registrar el decaimiento de masa de principio a fin, si queda masa remanente registrar este valor.
6. Una vez finalizado el ensayo, dejar 20 minutos el ventilador del túnel de dilución encendido con el fin de purgar gases remanentes. Limpiar cámara de combustión.

Posterior al ensayo

1. Extraer sonda TESTO 350 desde el ducto, dejar operando en condiciones ambientales por al menos 10 [min] y exportar planilla de datos.
2. Realizar limpieza de TESTO 350. Revisar y cambiar filtros internos, revisar condensado, revisar y limpiar filtro de MP.
3. Izar la estufa y ducto de extracción de gases de forma de liberar de carga la balanza.
4. Guardar datos de registro de temperatura. Posteriormente, apagar computador.
5. Guardar datos de registro de masa. Posteriormente, apagar balanza.
6. Guardar bitácora con registro de eventos.

4.4.3. Cálculo de factores de emisión

Para el cálculo de los factores de emisión de los gases de escape primero se debe calcular la concentración en [mg/m³] a partir de los datos en concentraciones de ppm entregados por el TESTO 350 con la siguiente fórmula:

$$mg/m^3 = V^{-1} \cdot PM \cdot PPM \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde el volumen (V) en litros se corrige con la ley de gases ideales ($V=RT/P$) de la siguiente forma:

$$mg/m^3 = \frac{760 \cdot PM \cdot PPM}{62,4 \cdot (273,15 + T)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde:

PM: peso molecular del gas.

PPM: la concentración del gas

T: Temperatura del gas.

Luego, se calcula el factor de emisión (FE) con la siguiente fórmula:

$$FE \left[\frac{mg}{kg} \right] = \frac{\sum_{i=0}^n (mg/m^3) \cdot Q \cdot t}{m_c} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde:

i: Tiempo inicio de ensayo.

n: Tiempo final de ensayo.

mg/m³: Concentración del gas.

Q: Caudal de los gases.

t: Tiempo en segundo entre las mediciones.

m_c: Masa de combustible.

5. Resultados

5.1. Lavado de leña

5.1.1. Medición del contenido de humedad

En la Tabla 7, se presenta un resumen estadístico de las mediciones del contenido de humedad relativa realizadas en los 7 ensayos de leño-limpio. Los valores medios del contenido de humedad previo a la etapa de lavado de los leños se encontraron entre $9,25 \pm 0,354\%$ y $23,73 \pm 1,21\%$, siendo estos inferiores a un 25% de humedad, dando cumplimiento a la normativa vigente (NCh 2907/2005) respecto al contenido de humedad para leña certificada.

Tabla 7: Resumen estadístico de las mediciones del contenido de humedad relativa antes de la etapa de lavado de los leños en los ensayos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

Ensayo de lavado	Identificación de leños	Número de mediciones	Media [%]	Desviación estándar	Valor mínimo [%]	Valor máximo [%]
E1	Leño 2	4	11,30	0,96	10,5	12,7
	Leño 7	4	12,00	1,087	11,3	13,6
	Leño 12	4	15,20	2,249	12,4	17,9
E2	Leño 3	10	11,90	0,622	11,1	13,0
	Leño 4	10	11,50	1,022	10,2	13,4
	Leño 13	10	16,70	2,951	13,3	21,1
E3	Leño 5	10	18,60	5,356	14,0	30,7
	Leño 6	10	13,00	0,855	11,8	14,3
	Leño 10	10	12,80	1,533	11,3	15,3
E4	Leño 8	10	16,00	2,797	13,7	22,1
	Leño 9	10	12,90	1,146	11,6	15,0
	Leño 11	10	17,30	3,272	14,5	22,3
E5	Leño 1	10	12,00	0,978	10,9	13,8
	Leño 14	10	11,50	1,155	10,0	12,8
	Leño 15	10	11,10	1,517	8,5	14,4
E6	Leño 4N	2	10,95	0,354	10,7	11,2
	Leño 6N	2	11,50	0,424	11,2	11,8
	Leño 7N	2	9,25	0,354	9,0	9,5
	Leño 8N	2	9,45	0,354	9,2	9,7
	Leño 9N	2	12,95	0,354	12,7	13,2
	Leño 10N	2	11,20	0,141	11,1	11,3
	Leño 12N	2	13,70	0,849	13,1	14,3
	Leño 13N	2	13,70	0,849	13,1	14,3
	Leño 14N	2	14,45	3,323	12,1	16,8
	Leño 15N	2	21,45	3,465	19,0	30,2
	Leño 16N	2	13,05	0,778	12,5	13,6
	Leño 17N	2	12,80	0,99	12,1	13,5
E7	Leño 18N	2	11,30	0,424	11,0	11,6
	Leño 1E	3	13,67	1,893	11,5	15,0
	Leño 3E	3	14,37	2,483	11,6	15,1
	Leño 6E	3	23,73	1,21	22,8	25,7
	Leño 7E	3	20,60	3,195	17,0	23,1
	Leño 9E	3	13,77	2,272	11,7	16,2
	Leño 10E	3	18,47	5,052	15,5	24,3
	Leño 11E	3	18,53	5,896	14,5	25,3
	Leño 12E	3	13,73	1,29	12,3	14,8
	Leño 13E	3	16,63	3,121	13,2	19,3
	Leño 14E	3	21,70	0,721	21,1	22,5
	Leño 15E	3	18,40	6,548	12,6	25,8
	Leño 16E	3	16,67	4,02	14,1	21,3
	Leño 17E	3	16,13	5,273	12,1	22,1

5.1.2. Conductividad, pH y temperatura ensayos leño-limpio

Como se mencionó en la sección 4.3.2 de acuerdo con el protocolo leño-limpio en la etapa 3 correspondiente al lavado se debe realizar un monitoreo del pH , conductividad y temperatura de la solución acuosa para conocer el comportamiento de estos parámetros durante la lixiviación. A continuación, se presentan los resultados de estos parámetros correspondientes a los 7 ensayos de leño-limpio y del agua desionizada utilizada como solvente.

5.1.2.1. Ensayos 1, 2, 3 y 4

Los ensayos 1, 2, 3 y 4 son los ensayos preliminares que se realizaron mientras se optimizaba el protocolo de leño-limpio. En estos ensayos se utilizaron 5 [kg] de leña inmersos en 20 [L] de agua desionizada. Los tres primeros fueron ensayos de 96 horas y el ensayo 4 tuvo una duración de 160 horas. La finalidad de estos ensayos fue evaluar el comportamiento del pH , conductividad y temperatura del lavado de leña durante la primera semana de lavado.

En el Gráfico 10 se observa que la conductividad al inicio de los ensayos (cuando son introducidos los leños en el agua desionizada) comienza en 25 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], la cual aumenta rápidamente a valores entre 300 y 370 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], alcanzando los primeros valores máximos durante las primeras 24 horas de ensayo y luego disminuyen a valores entre 200 y 250 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Después, la conductividad comienza a aumentar con una tendencia potencial hasta finalizar el ensayo, alcanzando valores entre 370 y 450 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. El tiempo que se lavó la leña en estos 4 ensayos no fue suficiente para alcanzar valores constantes en la conductividad, por lo que se decidió realizar lavados más extensos.

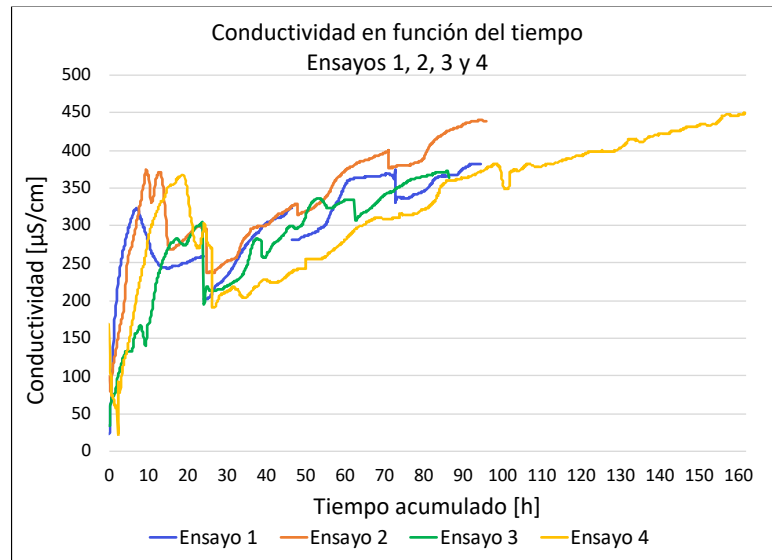


Gráfico 10: Conductividad en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4.

El pH mide el grado de acidez o alcalinidad de una solución en una escala de 0 a 14, en donde 0 es el valor más ácido y 14 el valor más básico de esta escala. El pH en función del tiempo de los ensayos 1, 2, 3 y 4 se puede observar en el Gráfico 11 y Gráfico 12, donde se nota claramente que el pH disminuye alcanzando valores cercanos a 4,5 [-] los cuales se mantienen relativamente estables en el tiempo para los cuatro ensayos de lavado.

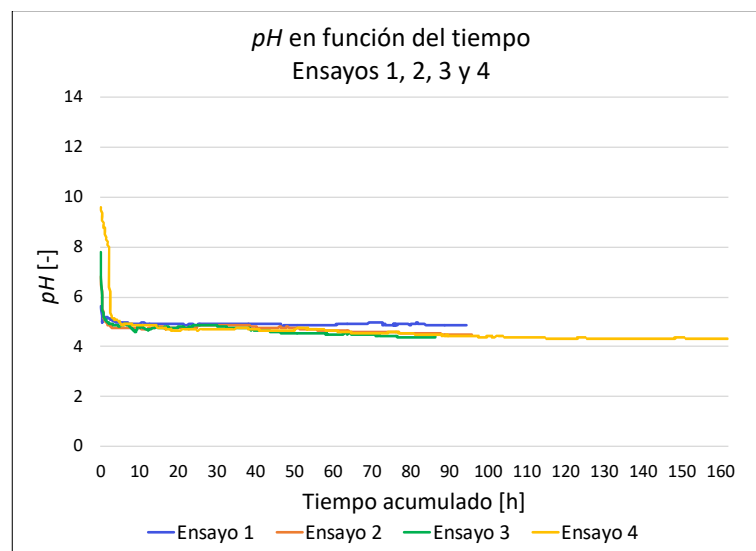


Gráfico 11: pH en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4. El pH se presenta en una escala de 0 a 14.

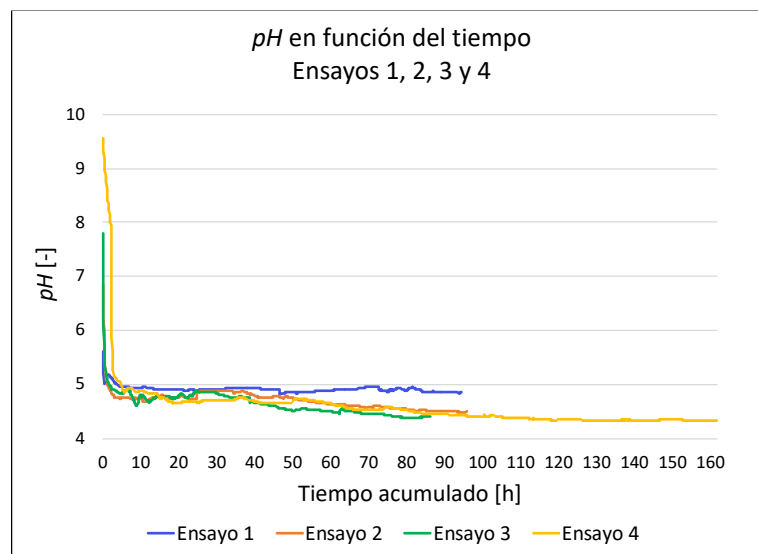


Gráfico 12: *pH* en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4. El *pH* se presenta en un rango de 4 a 10 para una mejor visualización.

Las mediciones de *pH* al inicio de los ensayos son de 5,62 [-], 6,84 [-], 7,81[-] y 9,56 [-] para los ensayos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Al notar una diferencia notoria del *pH* entre el agua desionizada utilizada para los ensayos de lavado se decidió comenzar las mediciones de *pH* y conductividad del agua 24 horas antes de la incorporación de los leños para que las mediciones se estabilicen y este factor no afecte tanto en el análisis de resultados.

En el Gráfico 13 se observan las oscilaciones de temperatura de los ensayos 1, 2, 3 y 4, las cuales tuvieron una variación entre 2 y 4 [°C] entre el día y la noche para todos los ensayos. En el ensayo 1 solo se registró la temperatura durante las primeras 40 horas, el cual se comenzó el 5 de julio del 2021, mientras que el ensayo 4 comenzó el 30 de agosto del 2021, por este motivo las temperaturas son levemente superiores.

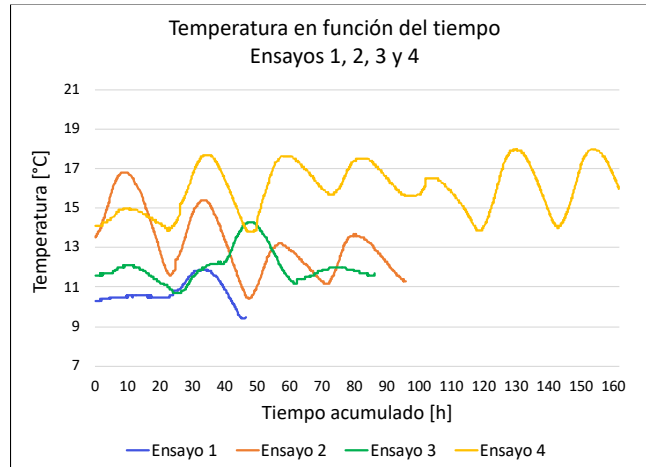


Gráfico 13: Temperatura en función del tiempo ensayos 1, 2, 3 y 4.

5.1.2.1. Caracterización agua desionizada

Se realizó la caracterización del agua desionizada para conocer la conductividad y el *pH* del agua antes de sumergir los leños. En el Gráfico 14 se presenta la conductividad en función del tiempo, la primera medición del electrodo de conductividad midió 27 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] la cual aumentó rápidamente (en menos de 6 minutos) a 54 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y luego comienza a disminuir gradualmente hasta alcanzar un valor constante de 25 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] trascurridas 22 [h] de medición. El comportamiento de la conductividad eléctrica en función del tiempo indica que el electrodo necesita un tiempo de estabilización en las mediciones de al menos 22 [h] para la cantidad de agua utilizada (20 [L]). Se debe tener en cuenta que en estas mediciones solo se contaba con un punto de calibración para el electrodo de conductividad (12880 [$\mu\text{m}/\text{cm}$]).

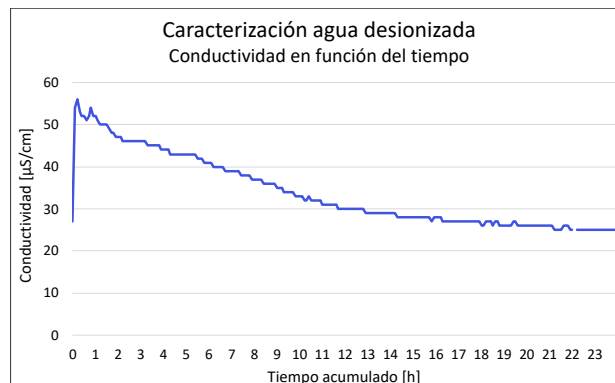


Gráfico 14: Conductividad en función del tiempo para la caracterización del agua desionizada.

En el Gráfico 15 se tiene el comportamiento del pH en función del tiempo y se puede apreciar que el agua desionizada alcanza rápidamente un valor constante de pH débilmente ácido. Al estabilizarse la medición de pH se alcanza un valor de 5,71 [-] transcurridas 9 horas de medición, en el Gráfico 16 se puede apreciar mejor este comportamiento ya que se utiliza un rango más pequeño de pH .

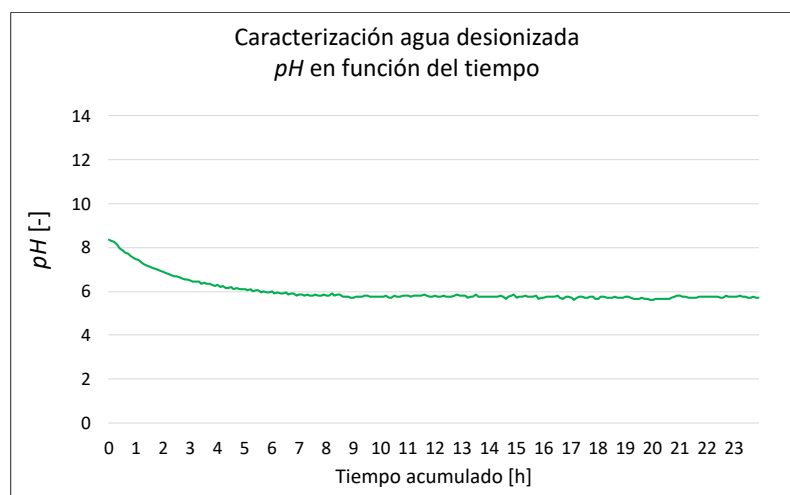


Gráfico 15: pH en función del tiempo de la caracterización del agua desionizada. El pH se presenta en una escala de 0 a 14.

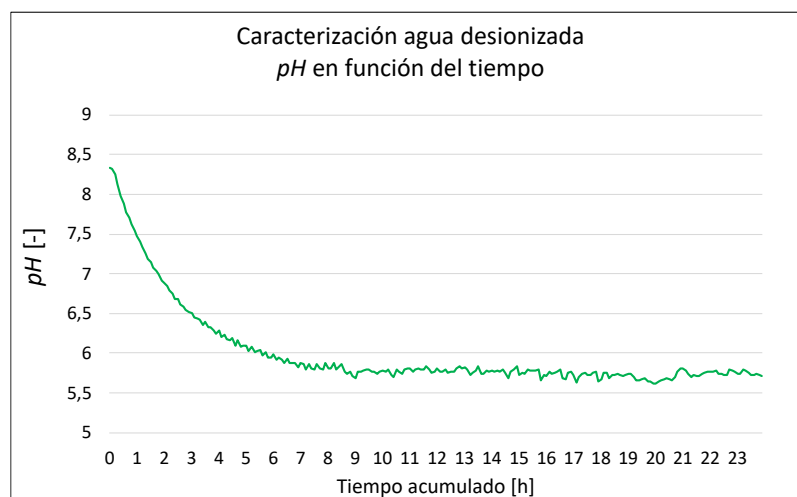


Gráfico 16: pH en función del tiempo para la caracterización del agua desionizada. El pH se presenta en un rango de 5 a 9 para una mejor visualización.

5.1.2.2. Ensayos 5 y 7

Los ensayos 5 y 7 corresponden a ensayos extensos de un ciclo de lavado con una duración de 47 y 98 días respectivamente. Previo a los ensayos se comenzó con la medición de conductividad y *pH* del agua desionizada durante 24 horas para la estabilización de los electrodos y luego se inician los ensayos con la incorporación de los leños al macerador. Cabe destacar que las mediciones del ensayo 7 se realizaron con dos puntos de calibración en el electrodo de conductividad, mientras que para el ensayo 5 solo se utilizó un punto de calibración por lo que las mediciones del ensayo 7 tienen una mayor precisión.

La curvas de los ensayos (Gráfico 17) se acercan a una función potencial en donde las pendientes entre los valores iniciales y finales ($n = \frac{\log y_2 - \log y_1}{\log x_2 - \log x_1}$) son 0,341 y 0,519 para los ensayos 5 y 7 respectivamente, esto indica que en el ensayo 5 la extracción fue más eficiente, y tendió a valores constantes de conductividad más rápido que el ensayo 7.

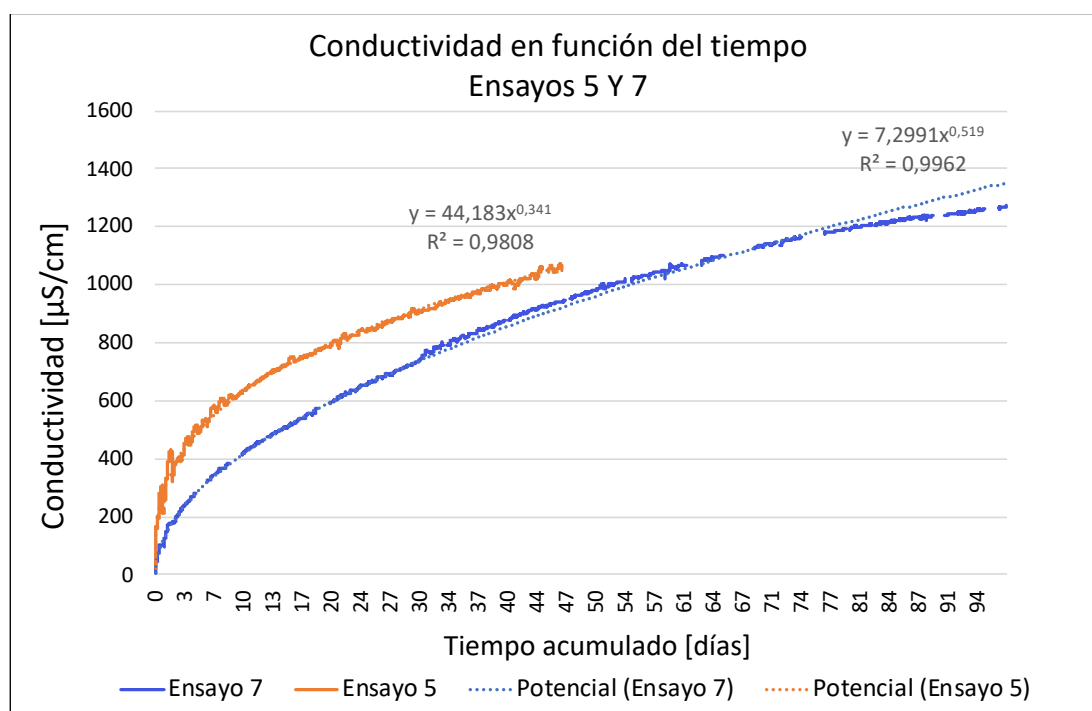


Gráfico 17: Conductividad en función del tiempo ensayos 5 y 7. Ensayos completos.

Una explicación a este comportamiento es que la leña del ensayo 5 correspondía a troncos grandes partidos por la mitad y con corteza gruesa en la mitad de su superficie, mientras que los leños del ensayo 7 correspondían a troncos con un diámetro menor con corteza delgada en la totalidad de su superficie, por lo que probablemente la extracción se realizó más lentamente en el ensayo 7 debido a la barrera de la corteza.

Al observar los valores iniciales de conductividad de los ensayos 5 y 7 en el Gráfico 18, durante las primeras 15 horas se nota un primer valor máximo en donde la medición en el ensayo 5 aumenta desde 20 a 301 $[\mu\text{m}/\text{cm}]$, mientras que en el ensayo 7 aumenta de 3 a 104 $[\mu\text{m}/\text{cm}]$. Luego, transcurridas 24 horas se observa un decaimiento en la conductividad en ambos ensayos, lo cual puede ser debido a que cada 24 horas se realiza una agitación manual para homogenizar la solución acuosa, también se observa que el decaimiento es más notorio en el ensayo 5, es probable que se hayan tenido mayores concentraciones de extractos cerca del electrodo y/o también pudo ocurrir debido a que el instrumento de medición contaba con una menor precisión respecto al ensayo 7. Entre las 72 y 96 horas de los ensayos el aumento de conductividad fue de 14,541% y 15,556% para los ensayos 5 y 7 respectivamente.

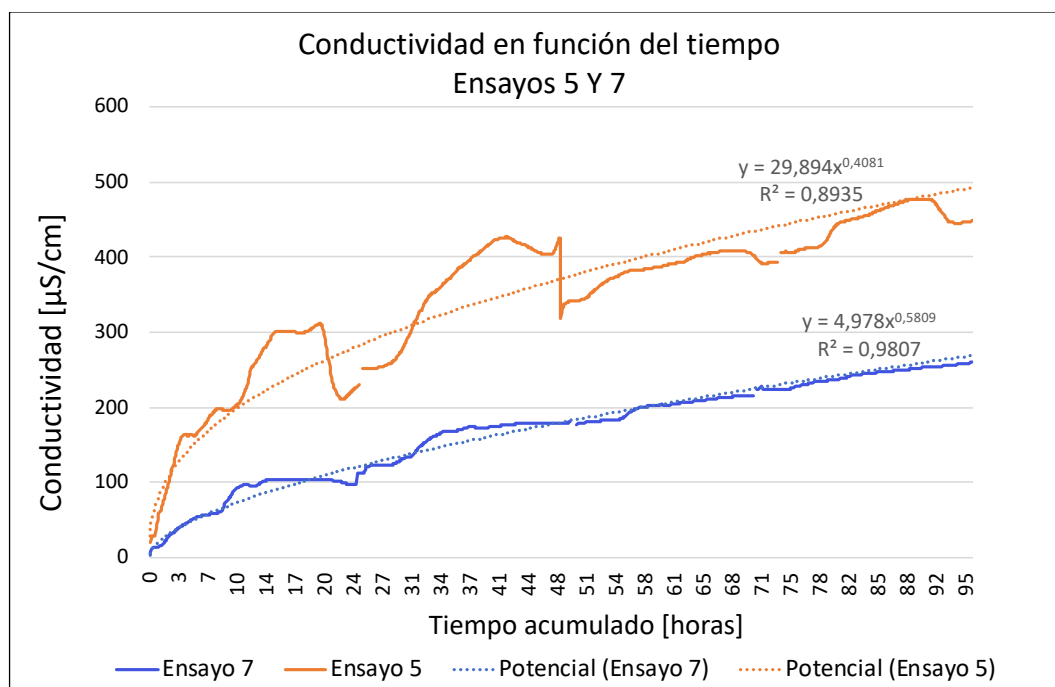


Gráfico 18: Conductividad en función del tiempo ensayos 5 y 7. Primeras 96 horas de ensayo.

Los valores de conductividad transcurridos 47 días de ensayo son de 1054 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] en el ensayo 5 con un aumento de 0,861% respecto al día anterior y 949 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] en el ensayo 7 con un aumento de 0,957% respecto al día anterior. Se decidió continuar el ensayo 7 por más días para evaluar su comportamiento y a los 97 días de duración se alcanzó una conductividad de 1267 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] con un aumento de 0,396% respecto al día anterior. Comparando los valores entre los 47 y 97 días del ensayo 7 hay un aumento de conductividad de un 33,5% y teniendo en cuenta que para este aumento se necesita el doble de tiempo se recomienda realizar ensayos por etapas y acelerar el proceso. Los valores de los aumentos diarios de la conductividad eléctrica se pueden observar en el Anexo 1 y Anexo 2.

Respecto al pH , como se observa en el Gráfico 19, el agua desionizada antes de sumergir los leños tiene valores cercanos al neutro, siendo 5,2 [-] y 5,8 [-] para los ensayos 5 y 7 respectivamente. Luego, se observa una rápida disminución hasta el día 4, y después tiende a continuar relativamente constante en el transcurso del tiempo con valores entre 4,4 [-] y 4,7 [-]; en el Gráfico 20 (en un rango de 4.0 a 6.5 para una mejor visualización) se puede observar con más detalle que a partir del día 47 los valores tienen variaciones casi nulas.

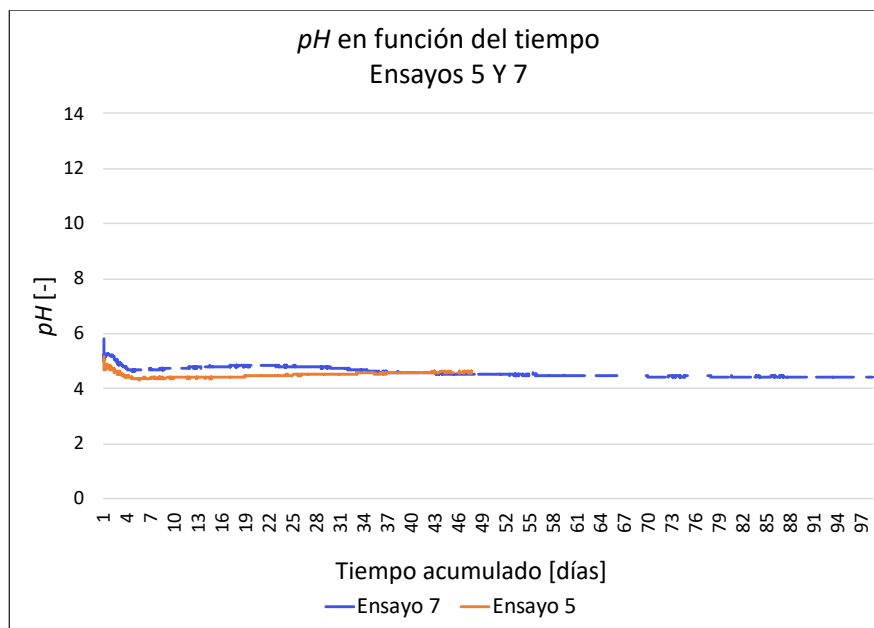


Gráfico 19: pH en función del tiempo ensayos 5 y 7. Escala de pH de 0 a 14.

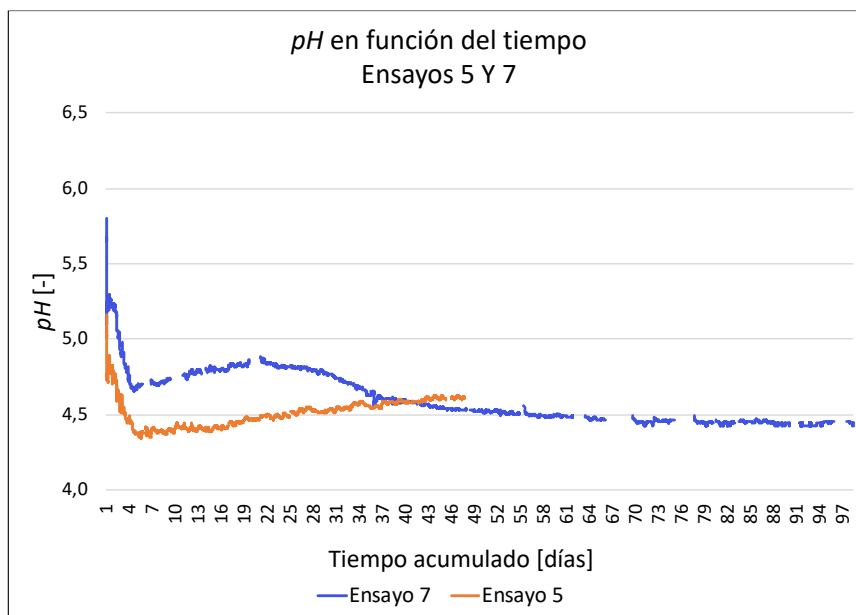


Gráfico 20: *pH* en función del tiempo ensayos 5 y 7. El *pH* se muestra en un rango de 4,0 a 6,5 para una mejor visualización.

Según la literatura (Rowell, 2005), en general el *pH* de la corteza es más bajo que el de la albura y duramen debido al mayor contenido inorgánico presente en la corteza. Y como la corteza es la parte más expuesta en el proceso de lixiviación el *pH* disminuye rápidamente al comienzo de los ensayos.

En el Gráfico 21 se puede apreciar que las temperaturas de las soluciones acuosas de los ensayos 5 y 7 varían alrededor de 2 a 4 [°C] entre el día y la noche. El ensayo 5 se realizó en primavera y tuvo una temperatura promedio de 17,1[°C], mientras que el ensayo 7 se realizó en verano y tuvo una temperatura promedio de 21,6 [°C]. Según la literatura (Rowell, 2005; Schmidt et al., 2018) una mayor temperatura favorece los intercambios iónicos y el proceso de extracción, pero en esta investigación la temperatura no fue un parámetro tan variable ya que en el ensayo 7 solo se tienen alrededor de 4,5 [°C] por sobre las temperaturas del ensayo 5.

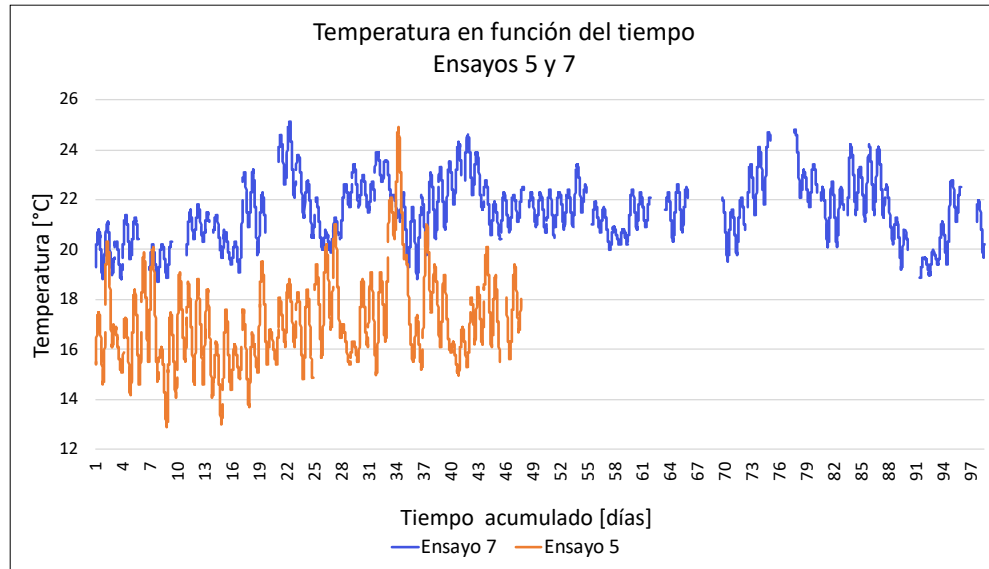


Gráfico 21: Temperatura en función del tiempo ensayos 5 y 7.

5.1.2.3. Ensayo 6

El ensayo 6 corresponde a un ensayo realizado por etapas, en donde se realizaron 4 ciclos ($n=4$) de lavado con renovación del agua desionizada cada 7 días y agitación manual cada 24 horas. En este ensayo se utilizaron 15 [kg] de leña inmersos en 60 [L] de agua desionizada.

El comportamiento de la conductividad se puede percibir en el Gráfico 22. La conductividad del agua desionizada al inicio de los ensayos tuvo valores de 9, 3, 4 y 3 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] para los ciclos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. La curva azul del Gráfico 22 corresponde al primer ciclo de lavado y se nota que durante el primer día la conductividad aumenta de forma lineal y luego de la primera agitación esta aumenta 6 veces su valor alcanzando los 300 [$\mu\text{m}/\text{cm}$], después de la segunda agitación los valores disminuyen 100 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] aproximadamente, y luego vuelven a aumentar con una curva que tiende a ser una función potencial alcanzando 420 [$\mu\text{m}/\text{cm}$] acabado el primer ciclo ($n=1$). Luego de filtrar el agua de lavado y renovar con agua desionizada comienza el segundo ciclo de lavado ($n=2$), el cual aumenta de forma lineal alcanzando al cabo de 7 días una conductividad de 207 [$\mu\text{m}/\text{cm}$]. Con una nueva renovación de agua desionizada comienza el ciclo 3 ($n=3$), el cual se comporta de forma lineal con una pendiente levemente inferior a la del ciclo anterior y finalizado el ciclo se alcanza

una conductividad de 153 $\mu\text{m}/\text{cm}$. El cuarto y último ciclo de lavado ($n=4$) también tiene un comportamiento lineal en la conductividad y sus valores en el tiempo son muy parecidos al del ciclo anterior ($n=3$), este alcanza una conductividad de 150 $\mu\text{m}/\text{cm}$, por lo que se decide acabar con el proceso de lavado. Sumando las conductividades finales del agua de lavado de cada ciclo se tiene un total de 930 $\mu\text{m}/\text{cm}$, un valor muy similar a la conductividad alcanzada por los ensayos extendidos (5 y 7).

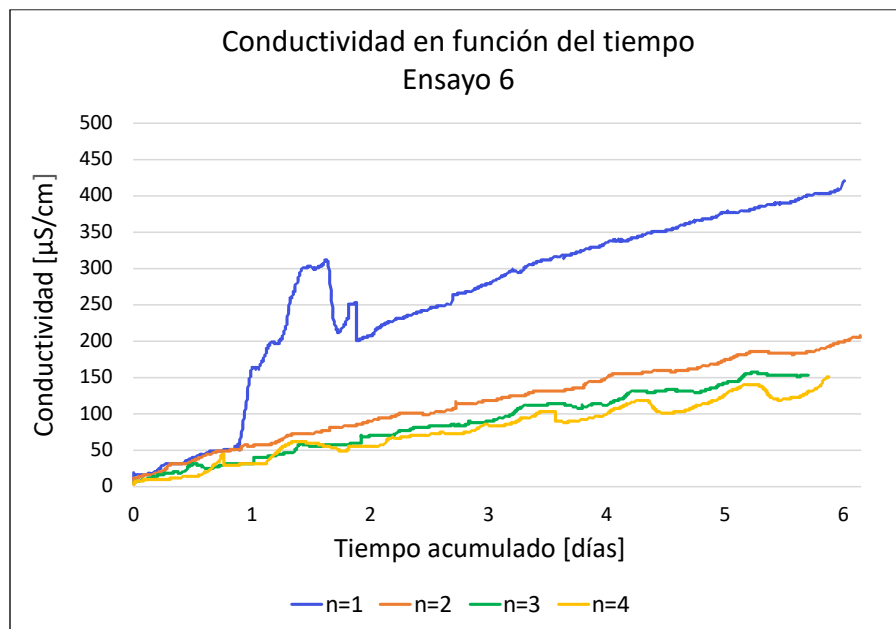


Gráfico 22: Conductividad en función del tiempo ensayo 6.

El pH en función del tiempo del ensayo 6 se puede ver en el Gráfico 23 (en una escala de 0 a 14), el agua desionizada al comienzo de cada ciclo tiene valores muy cercanos al neutro, siendo estos: 7,79 [-], 6,26 [-], 6,53 [-] y 6,54 [-] para los ciclos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Esto se puede observar más claramente en el Gráfico 24 (pH en un rango de 4 a 8 para una mejor visualización).

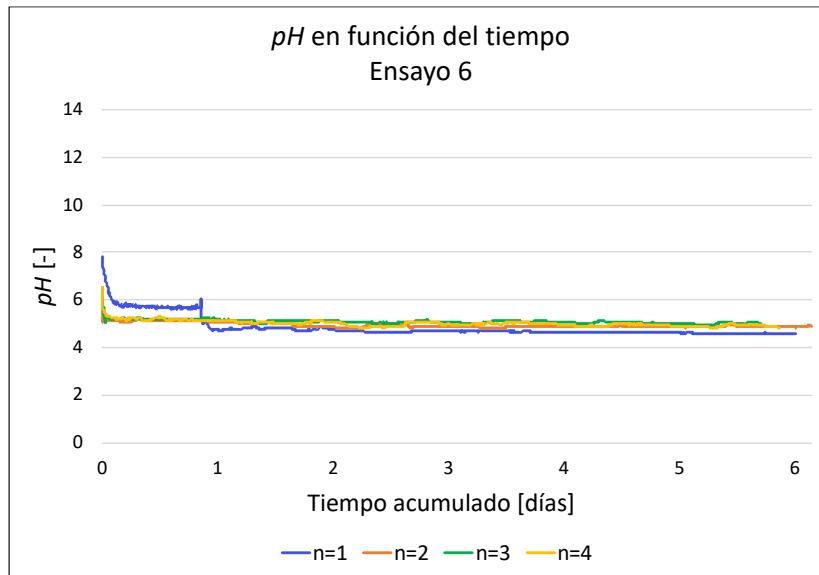


Gráfico 23: pH en función del tiempo ensayo 6.

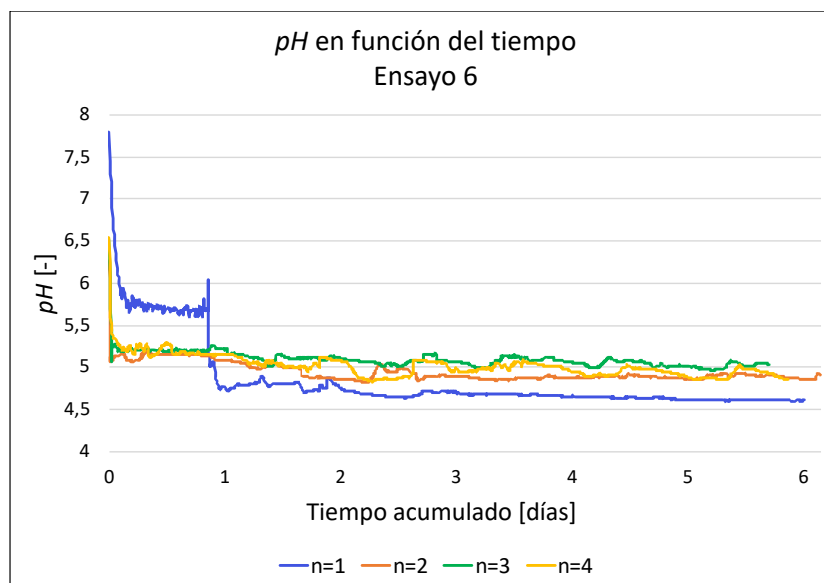


Gráfico 24: pH en función del tiempo ensayo 6. El pH se muestra en un rango de 4 a 8 para una mejor visualización.

Durante el primer ciclo de lavado, el pH disminuyó rápidamente, llegando a un valor de 5,7 [-] aproximadamente transcurridas 4 horas de ensayo el cual se mantiene constante hasta la primera agitación, luego disminuyó a 5,0 [-] aproximadamente, llegando a un valor de 4,61 [-] al finalizar la primera semana de lavado. En el segundo ciclo de lavado la disminución de pH en la solución acuosa llega a 5,1 [-] transcurridos

36 minutos desde el inicio del ciclo y este valor se mantuvo prácticamente constante en el tiempo llegando a un valor final de 4,91 [-]. En el tercer y cuarto ciclo de lavado el comportamiento es muy parecido al segundo ciclo, llegando a valores de 5,03 [-] y 4,85 [-] respectivamente. Como se mencionó anteriormente, en general, el *pH* de la corteza es más bajo que el *pH* de la albura y duramen, por lo que los resultados de los lavados por ciclos son concordantes con esta afirmación, ya que, el *pH* del primer ciclo de lavado es el que más disminuye.

La temperatura de los cuatro ciclos de lavado se puede observar en el Gráfico 25, en donde se tiene un máximo de 22,6 [°C] en el ciclo 1 y un mínimo de 16,9 [°C] en el ciclo 2. La temperatura promedio de los ciclos fue de 18,7 [°C], 18,6 [°C], 19,4 [°C], y 18,8 [°C] para los ciclos n=1, n=2, n=3 y n=4 respectivamente.

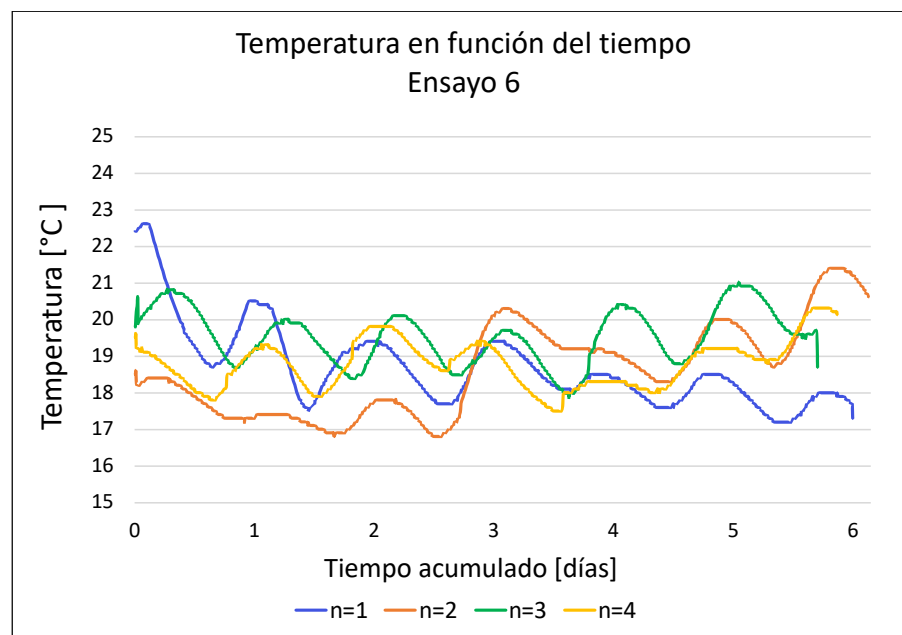


Gráfico 25: Temperatura en función del tiempo ensayo 6.

5.1.3. Secado

En la Tabla 8, se presentan los contenidos de humedad de la leña sin lavar y de la leña lavada con diferentes tiempos de secado. Los datos de medición son tomados con el xilohigrómetro. El contenido de humedad de la leña lavada en un Tiempo 1 (0 días de secado), varía entre $21,8 \pm 8,3\%$ y $31,1 \pm 9,1\%$ en los ensayos cortos (E1, E2, E3 y E4); entre $25,6 \pm 1,1\%$ y $43,9 \pm 13,2\%$ en el ensayo 6; entre $16,0 \pm 4,7\%$ y $28,7 \pm 15,9\%$ en el ensayo 7. Los leños lavados del ensayo 7 se expusieron 1 hora a la intemperie un día soleado antes de tomar el contenido de humedad, razón a la que se asocia un menor contenido de humedad. Al comparar los valores de humedad antes y después del lavado, el contenido de humedad aumenta entre 7,7 y 17,7% en los ensayos de lavado cortos (E1, E2, E3 y E4); entre 11,9 y 32,6% en el ensayo 6; y entre 0 y 9,8% en el ensayo 7.

En el proceso de secado los leños disminuyen el contenido de humedad en función del tiempo, alcanzando un contenido de humedad igual o inferior a la inicial (leña no lavada) en un tiempo entre 22 y 27 días para el caso de los ensayos cortos (E1, E2, E3 y E4) y para el caso del ensayo por etapa (E6) el tiempo de secado hasta la humedad inicial (leña no lavada) es de 75 días, sin embargo, a los 34 días de secado todos los leños de este ensayo ya presentaban un contenido de humedad inferior a un 25%.

Considerando que el instrumento de medición (xilohigrómetro) solo mide la humedad superficial, también se registró la masa durante el proceso de secado para llevar un control de la disminución de humedad. El resumen de los valores se puede observar en la Tabla 9.

Los leños que se lavaron tenían una masa entre 759 y 1862 [g] y en promedio tuvieron un aumento de 492 [g] luego del lavado. El tiempo de secado para alcanzar una masa cercana a la masa inicial es entre 31 y 56 días para los ensayos cortos (E1, E2, E3 y E4) y de 75 días aproximadamente para el ensayo por etapas (E6), lo que concuerda con el tiempo de secado según los registros de humedad relativa. Para esta investigación no se alcanzó a tomar registro del secado de los leños del E7.

Tabla 8: Resumen del contenido de humedad relativa de los leños lavados pertenecientes a los ensayos 1, 2, 3, 4, 6 y 7 a diferentes tiempos de secado.

Ensayo de lavado	Número de leño	Leña no lavada	Leña lavada				
		Media [%]	Tiempo 1 Media [%]	Tiempo 2 Media [%]	Tiempo 3 Media [%]	Tiempo 4 Media [%]	Tiempo 5 Media [%]
E1	Leño 2	11,3±1,0	29,0±7,1	11,3±1,6	12,3±1,7	12,3±2,7	10,4±1,3
	Leño 7	12,0±1,1	28,7±3,4	11,3±2,6	11,9±1,6	12,4±2,0	10,3±1,3
	Leño 12	15,2±2,2	27,6±4,9	13,2±3,7	14,6±3,6	13,7±2,6	11,2±1,5
E2	Leño 3	11,9±0,6	24,4±4,8	18,3±3,8	16,7±5,6	11,6±1,0	9,9±0,6
	Leño 4	11,5±1,0	21,8±8,3	18,9±3,0	17,7±7,1	11,5±1,1	10,1±0,5
	Leño 13	16,7±3,0	28,9±5,1	23,6±1,3	21,4±8,8	13,5±1,9	11,4±1,3
E3	Leño 5	18,6±5,4	31,1±9,1	30,5±6,6	16,8±7,1	13,6±6,5	10,7±2,1
	Leño 6	13,0±0,9	28,9±7,7	25,1±2,4	13,0±2,4	10,5±1,3	9,2±0,3
	Leño 10	12,8±1,5	29,9±5,3	26,6±2,2	12,5±2,3	9,9±1,3	9,6±1,0
E4	Leño 8	16,0±2,8	27,2±9,8	21,8±13,8	14,8±9,5	12,8±5,3	8,4±1,6
	Leño 9	12,9±1,1	25,7±8,8	13,6±1,4	11,4±1,0	9,7±0,8	8,5±1,1
	Leño 11	17,3±3,3	25,0±2,1	20,4±5,4	14,7±4,4	11,4±2,8	9,3±3,6
E6	Leño 4N	11,0±0,4	37,7±21,0	25,4±18,1	18,3±7,8	13,1±7,2	8,7±0,6
	Leño 6N	11,5±0,4	34,6±12,0	30,6±12,8	29,5±13,3	13,3±5,0	11,5±2,0
	Leño 7N	9,3±0,4	25,6±1,1	22,5±14,5	17,4±5,8	13,1±7,2	9,5±1,4
	Leño 8N	9,5±0,4	39,0±9,6	25,5±11,1	24,3±13,2	11,8±3,0	8,7±0,5
	Leño 9N	13,0±0,4	35,3±15,6	24,2±1,8	22,1±12,4	14,3±6,4	10,1±1,9
	Leño 10N	11,2±0,1	34,2±9,5	23,2±4,8	20,1±14,9	9,2±1,3	9,3±1,5
	Leño 12N	13,7±0,8	25,6±2,3	31,5±10,8	27,7±16,8	15,9±10,7	9,9±0,9
	Leño 13N	13,7±0,8	35,8±15,9	38,2±11,8	27,9±15,2	17,6±12,3	11,0±2,9
	Leño 14N	14,5±3,3	35,6±10,4	30,3±9,6	33,8±16,0	10,1±1,2	11,8±2,4
	Leño 15N	21,5±3,5	37,4±14,7	28,6±11,7	30,3±9,7	12,5±5,2	9,5±1,0
	Leño 16N	13,1±0,8	31,8±5,5	40,1±15,1	18,2±5,9	14,1±6,7	12,0±4,8
	Leño 17N	12,8±1,0	42,6±10,8	31,5±13,8	31,5±11,6	14,6±5,4	10,7±1,4
	Leño 18N	11,3±0,4	43,9±13,4	25,4±1,9	30,0±14,4	13,3±6,2	14,8±6,3
E7	Leño 1E	13,7±1,9	16,5±5,8	ND	ND	ND	ND
	Leño 3E	14,4±2,5	22,7±5,9	ND	ND	ND	ND
	Leño 6E	23,7±1,2	28,7±15,9	ND	ND	ND	ND
	Leño 7E	20,6±3,2	22,8±6,0	ND	ND	ND	ND
	Leño 9E	13,8±2,3	21,7±5,2	ND	ND	ND	ND
	Leño 10E	18,5±5,1	25,6±0,5	ND	ND	ND	ND
	Leño 11E	18,5±5,9	22,8±6,0	ND	ND	ND	ND
	Leño 12E	13,7±1,3	19,1±6,2	ND	ND	ND	ND
	Leño 13E	16,6±3,1	25,5±0,9	ND	ND	ND	ND
	Leño 14E	21,7±0,7	16,0±4,7	ND	ND	ND	ND
	Leño 15E	18,4±6,5	19,2±6,2	ND	ND	ND	ND
	Leño 16E	16,7±4,0	16,5±5,8	ND	ND	ND	ND
	Leño 17E	16,1±5,3	25,9±0,5	ND	ND	ND	ND

Tiempos de secado según ensayo: E1: T1= 0 días de secado; T2= 22 días de secado; T3= 26 días de secado; T4= 56 días de secado; T5= 96 días de secado. E2: T1= 0 días de secado; T2= 4 días de secado; T3= 10 días de secado; T4= 27 días de secado; T5= 61 días de secado. E3: T1= 0 días de secado; T2= 3 días de secado; T3= 25 días de secado; T4= 33 días de secado; T5= 69 días de secado. E4: T1= 0 días de secado; T2= 16 días de secado; T3= 22 días de secado; T4= 31 días de secado; T5= 45 días de secado. E6: T1= 0 días de secado; T2= 12 días de secado; T3= 21 días de secado; T4= 34 días de secado; T5= 75 días de secado. E7: T1= 0 días de secado; ND: No hay datos medidos.

Tabla 9: Resumen de la masa de los leños lavados pertenecientes a los ensayos 1, 2, 3, 4, 6 y 7 a diferentes tiempos de secado.

Ensayo de lavado	Número de leño	Leña no lavada	Leña lavada				
		Masa [g]	Tiempo 1 Masa [g]	Tiempo 2 Masa [g]	Tiempo 3 Masa [g]	Tiempo 4 Masa [g]	Tiempo 5 Masa [g]
E1	Leño 2	1862	2129	1883	1885	1879	1856
	Leño 7	1527	1784	1531	1531	1527	1508
	Leño 12	1581	1850	1574	1571	1559	1536
E2	Leño 3	1620	1911	1709	1666	1616	1599
	Leño 4	1810	2142	1936	1880	1813	1793
	Leño 13	1543	1838	1711	1638	1548	1520
E3	Leño 5	1628	1882	1801	1638	1603	1562
	Leño 6	1667	1987	1889	1697	1666	1634
	Leño 10	1679	2006	1917	1720	1685	1653
E4	Leño 8	1663	1991	1739	1678	1646	1615
	Leño 9	1689	2086	1771	1723	1682	1665
	Leño 11	1516	1979	1664	1571	1514	1482
E6	Leño 4N	759	1099	845	784	707	712
	Leño 6N	855	1303	1018	901	761	765
	Leño 7N	1139	1781	1383	1277	1114	1123
	Leño 8N	1470	2493	1838	1637	1415	1428
	Leño 9N	1305	1768	1417	1311	1143	1149
	Leño 10N	1136	1937	1339	1164	1019	1031
	Leño 12N	1481	ND	1137	1037	605	894
	Leño 13N	1481	2154	1715	1505	1262	1260
	Leño 14N	1241	1737	1412	1262	1084	1090
	Leño 15N	1342	2037	1549	1396	1050	1050
	Leño 16N	1039	1517	1146	1048	980	ND
	Leño 17N	1142	1712	1302	1176	995	1003
	Leño 18N	1109	1571	1265	1130	1038	ND
E7	Leño 1E	1065	1608	ND	ND	ND	ND
	Leño 3E	989	1636	ND	ND	ND	ND
	Leño 6E	951	1502	ND	ND	ND	ND
	Leño 7E	1086	1775	ND	ND	ND	ND
	Leño 9E	994	1452	ND	ND	ND	ND
	Leño 10E	1012	1661	ND	ND	ND	ND
	Leño 11E	1042	1676	ND	ND	ND	ND
	Leño 12E	1095	1596	ND	ND	ND	ND
	Leño 13E	995	1544	ND	ND	ND	ND
	Leño 14E	896	1303	ND	ND	ND	ND
	Leño 15E	1035	1578	ND	ND	ND	ND
	Leño 16E	1254	1859	ND	ND	ND	ND
	Leño 17E	1016	1560	ND	ND	ND	ND

Tiempos de secado según ensayo: E1: T1= 0 días de secado; T2= 22 días de secado; T3= 26 días de secado; T4= 56 días de secado; T5= 96 días de secado. E2: T1= 0 días de secado; T2= 4 días de secado; T3= 10 días de secado; T4= 33 días de secado; T5= 61 días de secado. E3: T1= 0 días de secado; T2= 3 días de secado; T3= 25 días de secado; T4= 33 días de secado; T5= 69 días de secado. E4: T1= 0 días de secado; T2= 16 días de secado; T3= 22 días de secado; T4= 31 días de secado; T5= 45 días de secado. E6: T1= 0 días de secado; T2= 12 días de secado; T3= 21 días de secado; T4= 75 días de secado; T5= 91 días de secado. E7: T1= 0 días de secado; ND: No hay datos medidos.

5.1.4. Extractos

La empresa SIDAL realizó la especiación inorgánica de los extractos lavados por ICP-PLASMA. Los extractos analizados corresponden a 100 [mL] de muestra de los lavados por ciclos, correspondiente al ensayo 6 de leño-limpio. Los resultados de la especiación inorgánica se pueden observar en la Tabla 10.

Tabla 10: Especiación inorgánica de los lavados por ciclo del ensayo 6. Datos analizados por SERVEL.

Extracto	pH	C.E [uS/cm]	Al [mg/L]	Ca [mg/L]	Cr [mg/L]	K [mg/L]	Mg [mg/L]	Mn [mg/L]	Na [mg/L]	P [mg/L]	N-NO ₃ [mg/L]
Ciclo 1	5,04	0,41	0,035	4,47	0,011	40,4	10,30	2,820	11,90	13,30	3,85
Ciclo 2	4,73	0,22	0,036	2,97	0,018	20,2	4,22	1,220	4,48	4,64	4,70
Ciclo 3	4,63	0,18	0,024	2,74	0,003	15,4	2,97	0,917	3,40	3,35	7,65
Ciclo 4	5,99	0,14	0,020	2,21	0,000	11,8	2,31	0,746	2,26	1,77	6,95

Los resultados muestran que los minerales solubles en agua desionizada que fueron extraídos en el proceso de lavado de leña son en orden decreciente: K, P, Na, Mg, N, Ca, Mn, Al y Cr. Según la literatura el contenido inorgánico de una madera generalmente se conoce como su contenido de cenizas y el Ca, Mg, y K constituyen el 80% de la ceniza en la madera (Rowell, 2005).

Como se puede observar en la Tabla 10, la extracción de minerales es mayor en el primer ciclo de lavado y disminuye conforme se realiza un nuevo ciclo. Esto ocurre para todos los minerales identificados, a excepción del N-NO₃, en donde se tienen mayores cantidades en los últimos ciclos de lavado.

5.2. Combustión

En la Tabla 11 se presenta un resumen de los datos correspondiente a los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.

Para el ensayo 9 se utilizaron dos leños sin lavar de *Eucalyptus globulus* y para los ensayos 10, 11 y 12 se utilizaron dos leños lavados de *Eucalyptus globulus* pertenecientes al ensayo 6 (por etapas) de leño-limpio, todos los leños utilizados en los ensayos de combustión fueron provenientes de la empresa Bosques del Norte S.A, presentaban corteza en la totalidad de su superficie, dimensiones similares (7 [cm] de diámetro y 25 [cm] de largo aprox.) y un contenido de humedad menor a un 25%. A

estos leños se les denominó “carga de ensayo” y se puede observar una representación de ellos en la Figura 23.



Figura 23: Carga de ensayo.

Como fue descrito en la metodología, previo a los ensayos se realizó un periodo de ignición para formar una cama de brasas homogénea y precalentar el hogar de combustión. En el periodo de ignición se utilizó una carga de leña trozada con una masa entre un 72% y 78% de la carga de ensayo, los leños utilizados para este periodo corresponden a *Eucalyptus globulus* con una humedad inferior a un 25%, y también se utilizaron entre 130 [g] y 180 [g] de hojas, cartones y ramas que fueron puestas bajo los trozos de leña para favorecer el encendido, la configuración de la carga de ignición (leña trozada, hojas, cartones, y ramas) se observa en la Figura 24.



Figura 24: Carga de ignición y configuración para el encendido.

En el encendido se mantuvo la entrada de aire primario en posición máxima, luego de 2-3 minutos se mantuvo la entrada de aire en el mínimo. En el ensayo 9 y 10 se dejó consumir la leña hasta que la masa llegó a un 20-25% de la carga de ensayo, pero se percataron errores en las mediciones del decaimiento de masa, por lo que se consideró un tiempo aproximado de 30 minutos para el periodo de ignición de los siguientes ensayos, para formar una cama brasas homogénea.

A los 10 minutos del periodo de ignición de los ensayos 9 y 10 se tomaron mediciones de la velocidad y temperatura en la apertura de muestreo del túnel de dilución con un termoanemómetro de punta incandescente D8060048. El valor promedio de estas mediciones es de 1,26 [m/s] y 45,25 [°C]. La velocidad de los gases es un parámetro necesario para el cálculo de los factores de emisión de los gases.

En los cuatro ensayos de combustión el periodo de ensayo tuvo una duración de 40 minutos (sin considerar el periodo de ignición), se mantuvo la entrada de aire primario en posición mínima y el ventilador del túnel de dilución en máxima potencia.

Con el equipo analizador de gases de combustión (TESTO 350) se midieron los gases de escape cada 1 minuto y se utilizó un factor de dilución igual a 1. El sensor del TESTO 350 se mantuvo en la apertura de muestreo del túnel de dilución de forma continua durante el periodo de ensayo.

Tabla 11: Resumen de los datos de los ensayos de combustión 9, 10, 11 Y 12.

Ensayos de combustión	Ensayo 9		Ensayo 10		Ensayo 11		Ensayo 12	
Tipo de estufa	Convencional (vermiculita)		Convencional (vermiculita)		Convencional (vermiculita)		Convencional (vermiculita)	
Tipo de leña	E.G Certificado		E.G lavado		E.G lavado		E.G lavado	
Humedad leños [%]	Leño 1	13	Leño 10	10,2	Leño 12	12,1	Leño 6	11
	Leño 2	12,8	Leño 15	11,1	Leño 14	11,3	Leño 13	12,4
Masa leños [g]	Leño 1	914	Leño 10	1025	Leño 12	888	Leño 6	760
	Leño 2	1198	Leño 15	1039	Leño 14	1080	Leño 13	1249
Carga ignición [g]	1784		1750		1734		1587	
Carga ensayo [g]	2112		2064		1968		2009	
Tiempo periodo ignición	23 min		32 min		33 min		27 min	
Hora inicio ensayo	11:57:05		15:22:52		12:43:54		15:34	
Hora fin ensayo	12:36:49		16:02:33		13:23:38		16:14	
Tiempo de ensayo	39 min 44 s		39 min 41 s		39 min 44 s		40 min	
Admisión de aire periodo de ensayo	Mínima		Mínima		Mínima		Mínima	
Factor de dilución	x1		x1		x1		x1	
Velocidad de los gases [m/s]	1,1		1,42		N.D		N.D	
Temperatura de los gases [°C]	46,3		44,2		N.D		N.D	
Masa estufa + caño [kg]	105,12		105,15		104,63		103,48	
Carga remanente [kg]	0,36		0,43		1,14		2,02	
Comentarios	La báscula se tara luego de montar el sistema estufa + caño. Se vuelve a tarar luego de atizar las brasas.		La báscula se tara luego de montar el sistema estufa + caño. Luego no se tara más.		La báscula no se tara en ningún momento. La carga remanente se debe calcular.		La báscula no se tara en ningún momento. La carga remanente se debe calcular.	

N.D: No hay datos.

Como se observa en los comentarios de la Tabla 10, la báscula fue tarada en los ensayos 9 y 10, a diferencia de los ensayos 11 y 12 en donde no se tara en ningún momento, ya que, se percibieron errores en la medición del instrumento al momento de tarar. Los eventos ocurridos se pueden observar con mayor detalle en la bitácora del Anexo 3.

Durante el periodo de ensayo se realizan mediciones de la masa, temperatura y gases de escape (CO₂, CO, NO_x, NO, O₂, SO₂ y HC), las cuales se analizan a continuación.

5.2.1. Temperatura en ensayos de combustión.

Para la medición de temperatura en función del tiempo en los ensayos de combustión se utilizan termopares tipo K conectados al adquisidor de datos OMEGA DAQ-56 con exterior a 20 puntos. Estas se posicionan en el sistema como se puede observar en la Figura 25 y Figura 26. En donde la configuración de los termopares con el observador frente a la estufa es:

T₁: Fondo derecho (vermiculita).

T₂: Fondo izquierdo (vermiculita).

T₃: Lado derecho – fondo (vermiculita).

T₄: Lado derecho – frente (vermiculita).

T₅: Lado izquierdo – fondo (vermiculita).

T₆: Lado derecho – frente (vermiculita).

T₇: Gases dentro de cámara – lado derecho.

T₈: Gases dentro de cámara – lado derecho.

T₉: Ducto de gases de escape (por dentro).

T₁₀: Ambiente.

T₁₁: Pared exterior izquierda.

T₁₂: Pared exterior derecha.

T₁₃: Aire primario derecho.

T₁₄: Aire primario izquierdo.

T₁₅: Pared posterior.

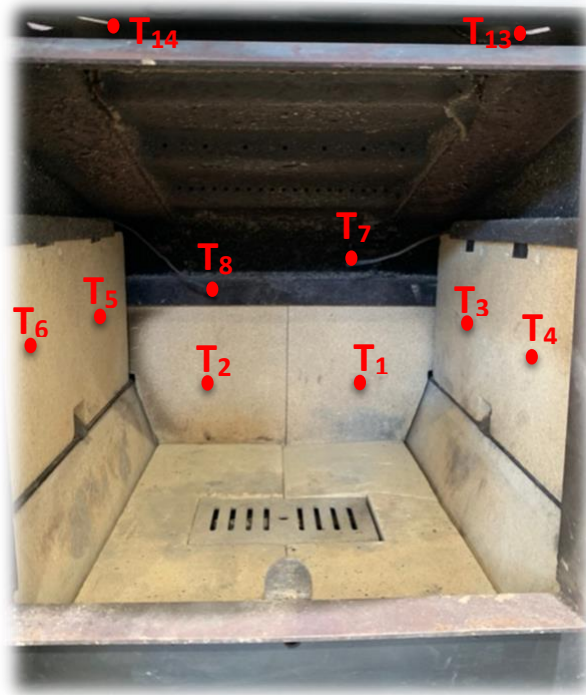


Figura 25: Configuración de termopares al interior del hogar de combustión.

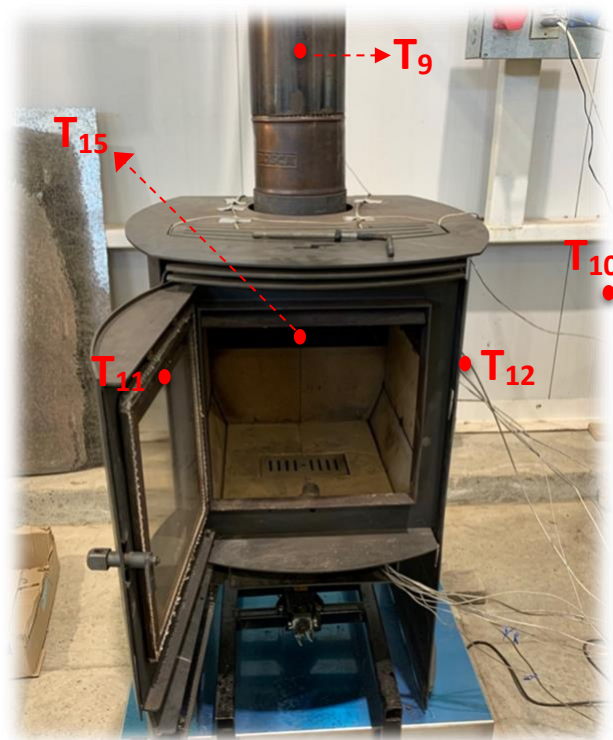


Figura 26: Configuración termopares al exterior del hogar de combustión.

Las temperaturas en función del tiempo de los ensayos 9, 10, 11 y 12 se pueden apreciar en el Gráfico 26, Gráfico 27, Gráfico 28 y Gráfico 29 respectivamente. Los promedios de las temperaturas en los 15 puntos de medición de los ensayos de combustión se pueden observar en la Tabla 12, estos promedios se calcularon con los valores de los primeros 17 minutos de cada ensayo, ya que, en el ensayo 9 (leña no lavada) solo se registraron mediciones durante ese tiempo.

En los ensayos destacan las elevadas temperaturas de los gases dentro de la cámara de combustión, cuyos termopares (T_7 y T_8) utilizados para su medición se encontraban posicionados sobre las llamas y alcanzaron valores cercanos a los 800 [°C] durante los primeros 5 minutos de ensayo y al finalizar los ensayos la temperatura de los gases tendió a valores cercanos a la temperatura de las paredes de vermiculita. La temperatura ambiente promedio de los ensayos 9, 10, 11 y 12 fue de 20 [°C], 25 [°C], 24 [°C] y 27 [°C] respectivamente. Se puede observar en el Gráfico 26 (leña no lavada) que las paredes externas al comienzo del ensayo se encuentran a temperaturas levemente superiores a las del resto de los ensayos, es probable que haya sido debido a que el periodo de ignición fue más corto que el resto de los periodos de ignición y las brasas estaban más encendidas, por lo que el valor mínimo que se midió fue de 214 [°C] (pared posterior), mientras que, en los ensayos 10, 11 y 12 la temperaturas mínimas de las paredes externas fueron 158 [°C] (pared posterior). Las temperaturas medidas en el exterior de la estufa (T_{11} , T_{12} y T_{15}) comienzan con una pequeña disminución durante los primeros dos minutos de ensayo y luego aumentan hasta alcanzar valores máximos entre los 10 y 15 min de ensayo cercanos a los 270 [°C] (para los cuatro ensayos), luego la temperatura decae levemente hasta alcanzar temperaturas muy cercanas a las del comienzo. Las temperaturas promedio al interior de la cámara de combustión en los termopares ubicados en las vermiculitas (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 y T_6) corresponden a 434 [°C], 376 [°C], 371 [°C] y 388 [°C] en los ensayos 9, 10, 11 y 12 respectivamente, mientras que las temperaturas promedio en los termopares ubicados en las entradas de aire primario (T_{13} y T_{14}) son de 376 [°C], 340 [°C], 327 [°C] y 345 [°C] en los ensayos 9, 10, 11 y 12 respectivamente. También se

midió la temperatura en el ducto de gases de escape y el promedio fué de 454 [°C], 385 [°C], 373 [°C] y 387 [°C] para los ensayos 9, 10, 11 y 12 respectivamente.

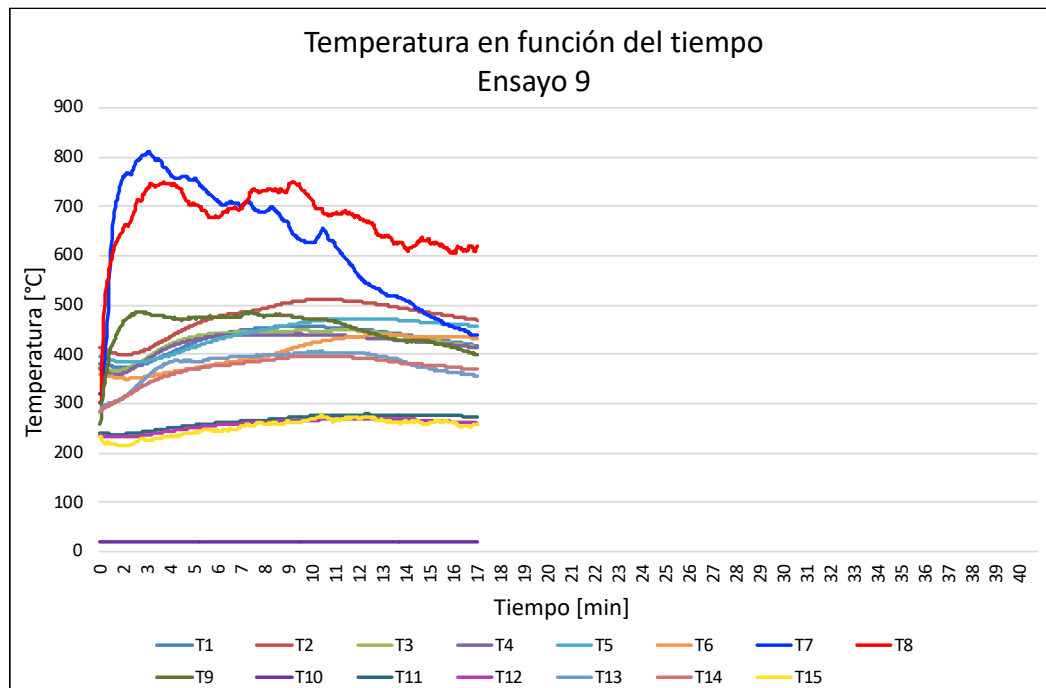


Gráfico 26: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 9.

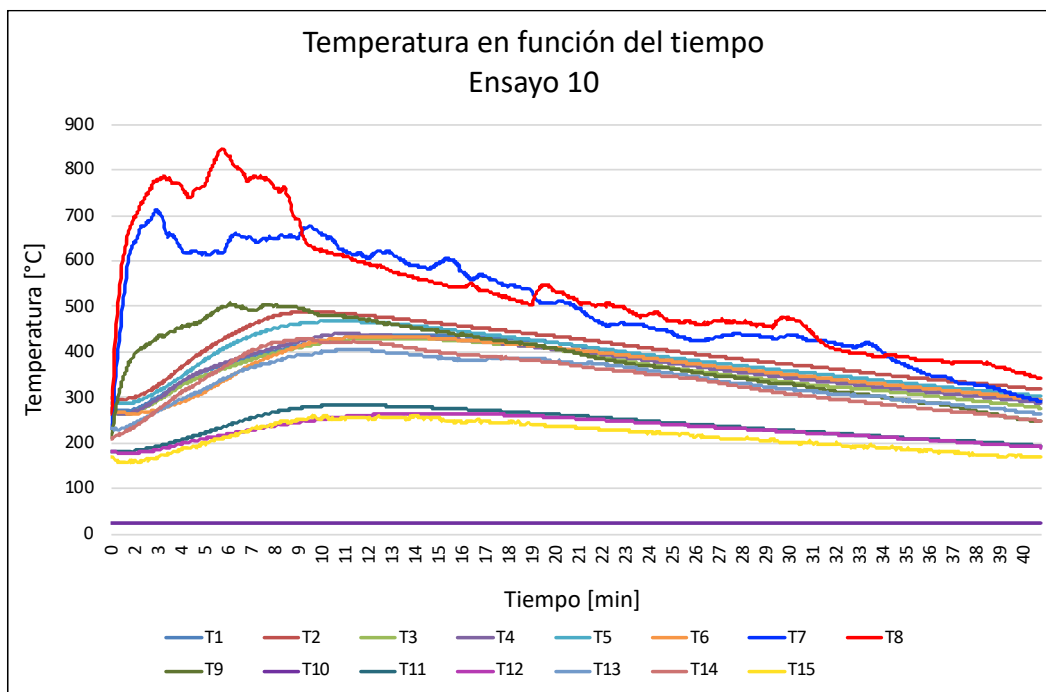


Gráfico 27: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 10.

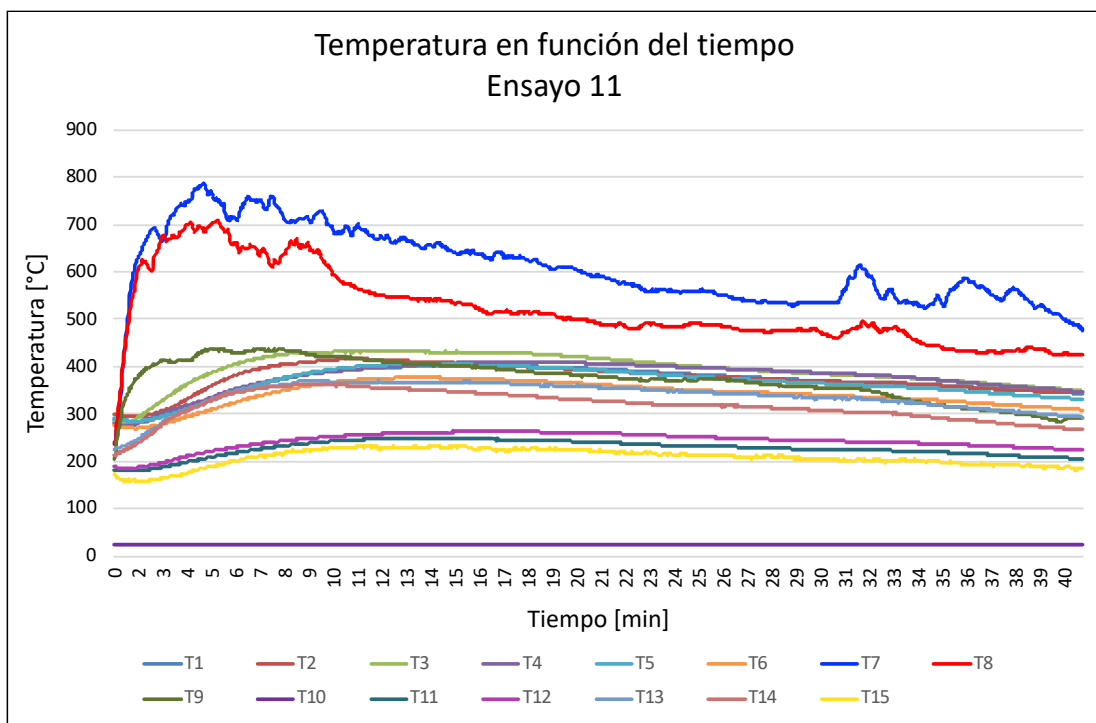


Gráfico 28: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 11.

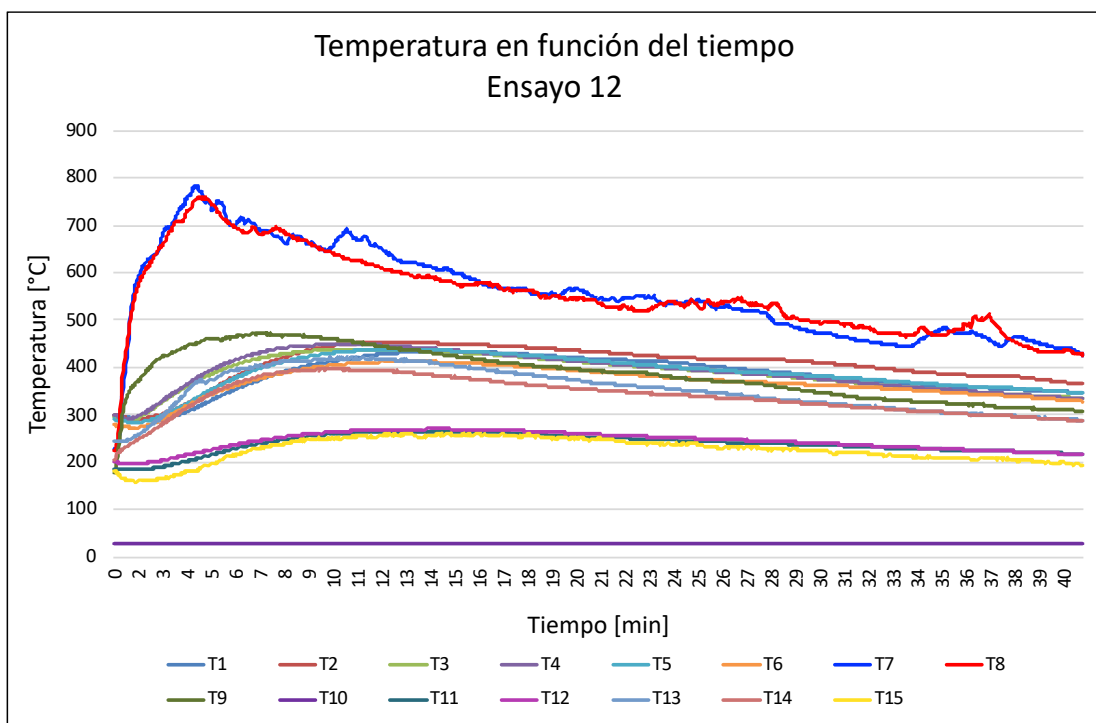


Gráfico 29: Temperatura en función del tiempo del ensayo de combustión 12.

Tabla 12: Temperatura promedio de los 15 puntos de medición en el sistema de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12 durante los primeros 17 minutos.

Termocupla	Ensayo 9	Ensayo 10	Ensayo 11	Ensayo 12
	Temperatura promedio [°C]	Temperatura promedio [°C]	Temperatura promedio [°C]	Temperatura promedio [°C]
T ₁ : Fondo derecho (vermiculita).	431	372	370	385
T ₂ : Fondo izquierdo (vermiculita).	474	402	376	406
T ₃ : Lado derecho – fondo (vermiculita).	430	360	394	388
T ₄ : Lado derecho – frente (vermiculita).	423	368	378	392
T ₅ : Lado izquierdo – fondo (vermiculita).	442	387	367	388
T ₆ : Lado derecho – frente (vermiculita).	403	365	341	368
T ₇ : Gases dentro de cámara – lado derecho.	628	502	608	558
T ₈ : Gases dentro de cámara – lado derecho.	676	533	520	555
T ₉ : Ducto de gases de escape (por dentro).	454	385	373	387
T ₁₀ : Ambiente.	20	25	24	27
T ₁₁ : Pared exterior izquierda.	266	240	227	238
T ₁₂ : Pared exterior derecha.	258	231	242	243
T ₁₃ : Aire primario derecho.	380	339	337	352
T ₁₄ : Aire primario izquierdo.	373	341	317	339
T ₁₅ : Pared posterior.	253	215	208	226

Al observar la Tabla 12 se puede apreciar que se calcula una temperatura promedio mayor en todos los puntos de medición del ensayo 9 (leña no lavada) a excepción de la T₁₀ (temperatura ambiente). Es posible que se pueda alcanzar una temperatura

mayor al utilizar leña no lavada, pero no se puede afirmar, ya que, existen otros parámetros que pudieron provocar mayores temperaturas, como por ejemplo el precalentamiento de la estufa durante el periodo de ignición o la configuración de los troncos de leña dentro de la cámara de combustión, entre otros.

Las temperaturas máximas y mínimas de cada punto de medición en los ensayos se pueden apreciar en el Anexo 4.

5.2.2. Decaimiento de masa en ensayos de combustión

En el Gráfico 30 se muestra el decaimiento de masa en función del tiempo acumulado de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12. Como se comentó anteriormente, la balanza fue tarada en los ensayos 9 y 10, a diferencia de los ensayos 11 y 12 en donde no se tara en ningún momento, ya que, se percibieron muchas variaciones en la medición del instrumento en los casos que se tara. Antes de cada ensayo se revisó que la chimenea de escape quedara libre y no apoyada en la abrazadera (Figura 27) para evitar errores en la medición de masa, sin embargo, por el movimiento de la chimenea de escape debido las presiones dentro de ella y la poca holgura de la abrazadera fue difícil controlar esta ocurrencia.

Como se puede observar en el Gráfico 30, en el ensayo 9 (líneas en azul) y ensayo 10 (líneas en rojo) la masa medida presenta mucha variabilidad, llegando a valores negativos cercanos a -1 [kg] o a valores muy altos cercanos a 7 [kg]; en los ensayos 11 y 12 se observa un decaimiento de masa más suave, con una tendencia lineal de disminución a partir de los 8 minutos en el ensayo 11 (líneas en verde) y a partir de los 5 minutos en el caso del ensayo 12 (líneas en lila), en los primeros minutos no se observa una disminución y probablemente esto se debe a que lo primero en quemarse es el material volátil y luego el carbono fijo. Como las condiciones de medición varían entre los ensayos, no es posible asociar una diferencia en el decaimiento de masa entre la combustión de leña lavada y sin lavar.

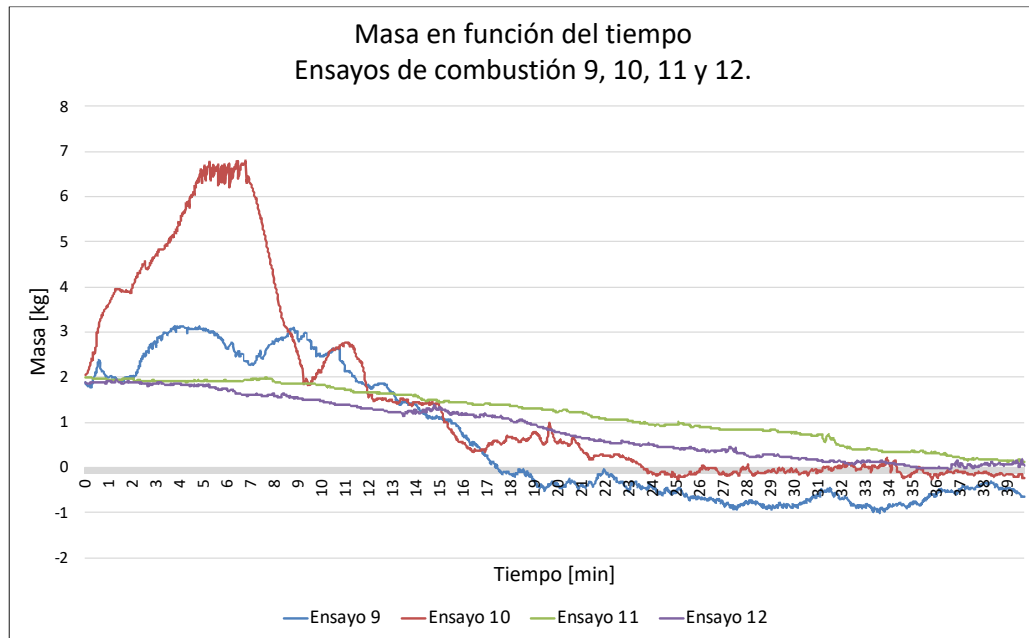


Gráfico 30: Decaimiento de masa en función del tiempo acumulado de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.



Figura 27: Sistema de sujeción de la chimenea de escape.

5.2.3. Concentración de gases de escape en ensayos de combustión

Con el equipo analizador de gases de combustión se midieron los gases de escape cada 1 minuto, utilizando un factor de dilución igual a 1. El monitoreo de los gases de escape se registró en los ensayos 9, 10 y 12, pero el ensayo 11 no se pudo monitorear producto de un mal funcionamiento en el equipo de medición (los filtros se encontraban tapados). Como se indica en la metodología, previo al ensayo la sonda del TESTO 350 se mantiene midiendo los gases del ambiente y al momento que se carga la estufa con la carga de ensayo ingresa la sonda al punto de medición en el túnel de dilución. Los resultados de las mediciones durante el periodo de ensayo se pueden observar a continuación:

En el Gráfico 31 se presenta el porcentaje de oxígeno en los gases de escape el cual varió entre 19 y 21% durante los 40 minutos de cada ensayo. Al inicio de la medición el instrumento mide valores cercanos al 21% de O_2 , el cual corresponde al porcentaje de oxígeno en el aire atmosférico, los cuales decaen bruscamente durante el momento de encendido de los leños a valores cercanos al 19% en los tres ensayos de combustión. El porcentaje de O_2 comienza a aumentar en los gases de escape a medida que se desarrolla la combustión alcanzando un 20,87%, 20,73% y 20,5% de O_2 finalizados los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente.

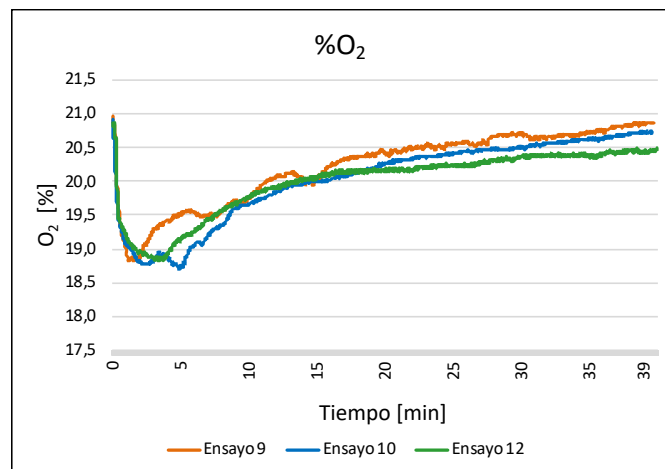


Gráfico 31: %O₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

El porcentaje de oxígeno que se reduce contribuye a la oxidación de los compuestos presentes en el combustible.

Como se puede apreciar en el Gráfico 32 el CO_2 alcanza valores muy próximos al 2% en los primeros 5 minutos de ensayo, llegando a 0,2%, 0,24% y 0,37% de CO_2 al final de los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente.

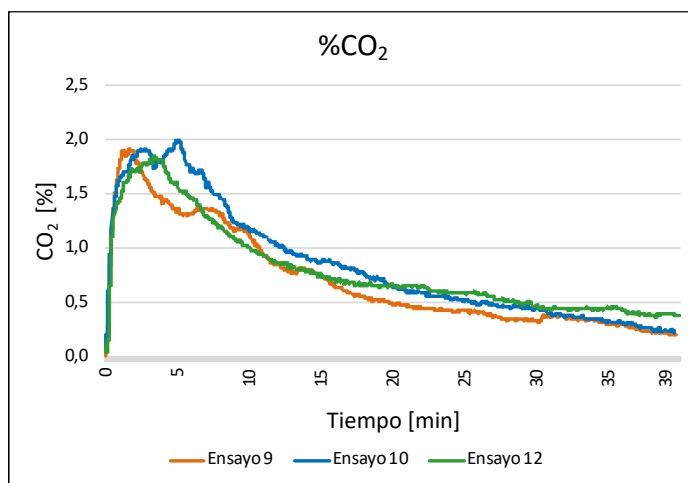


Gráfico 32: %CO₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

En el Gráfico 33 se puede observar la concentración de CO en los gases de escape durante los ensayos 9, 10 y 12, en donde se nota un marcado aumento de estos gases al comienzo de los ensayos alcanzando un máximo en un tiempo aproximado de 2 minutos y tienden a cero rápidamente para volver a aumentar de forma más lenta alcanzando una concentración cercana a 500 ppm, la cual se mantiene durante los últimos 15 minutos de ensayo. Las concentraciones máximas de CO son de 1127 ppm, 3113 ppm y 1495 ppm para los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente. El periodo de tiempo en que la concentración de CO tendió a cero corresponde al periodo donde la combustión fue más completa, el cuál fue más extenso en el ensayo 9 (leña certificada sin lavar).

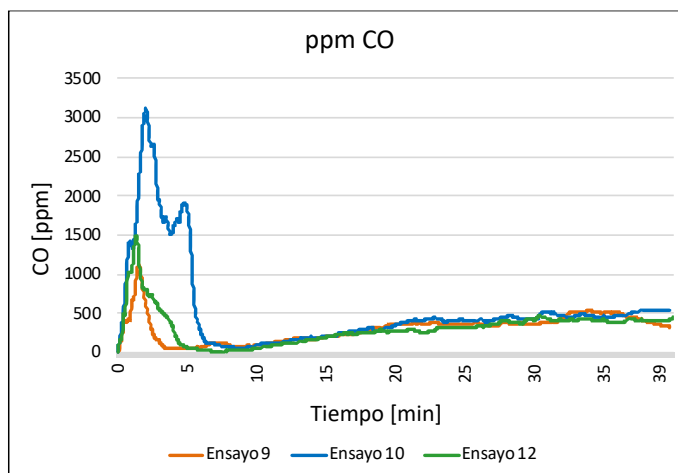


Gráfico 33: Concentraciones de CO en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

En el Gráfico 34 se presentan las concentraciones de hidrocarburos no quemados los cuales alcanzan concentraciones mayores en el ensayo 10, seguido por el ensayo 12; y las menores concentraciones se observan en el ensayo 9 (leña sin lavar).

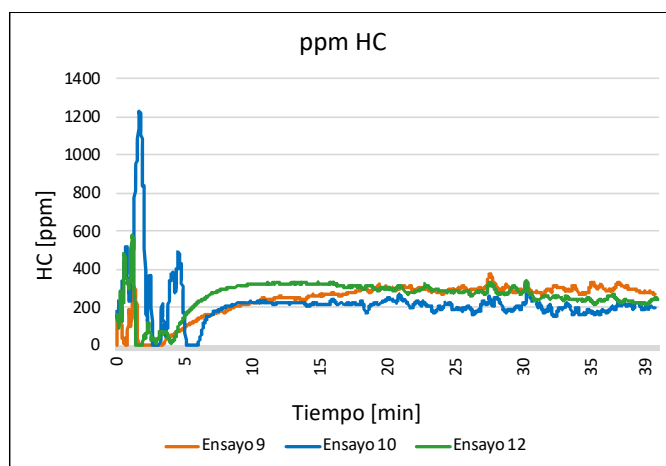


Gráfico 34: Concentraciones de HC en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

El nitrógeno atmosférico corresponde a un 78,084% de la composición del aire y es un gas inerte en la reacción química de combustión. En general, la madera posee poco contenido de azufre y nitrógeno, por lo que las concentraciones y emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno son muy reducidas en los gases de escape. Las concentraciones de NO_x se pueden observar en el Gráfico 35, las cuales llegan a un máximo entre los primeros 7 y 8 minutos de ensayo, cuyos valores máximos son de 12 ppm, 16 ppm y

9 ppm para los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente; mientras que en el Gráfico 36 se puede observar que los valores máximos de NO son de 11 ppm, 15 ppm y 9 ppm para los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente. Los valores finales de concentración de NO_x y NO en los ensayos se encuentran entre 1 ppm y 2 ppm.

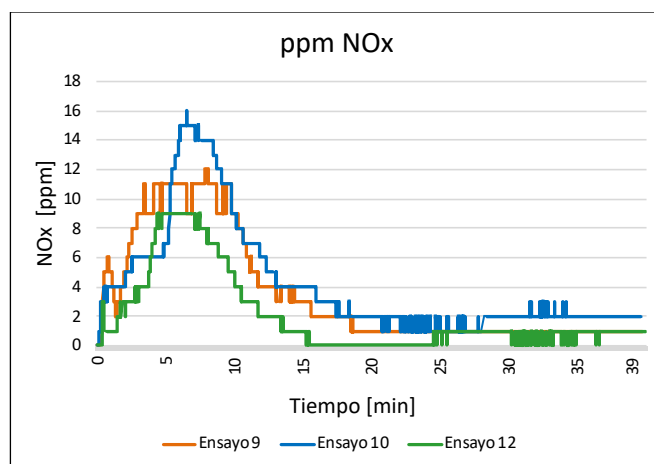


Gráfico 35: Concentraciones de NO_x en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

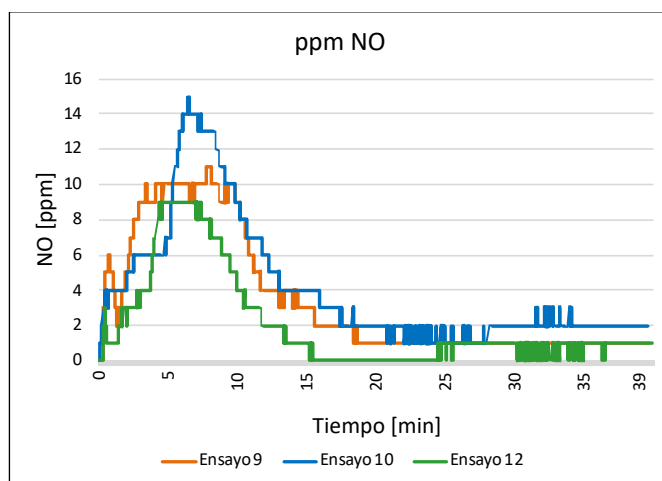


Gráfico 36: Concentraciones de NO en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

Las concentraciones de dióxido de azufre se ven representadas en el Gráfico 37, estas concentraciones son despreciables en los ensayos 9 y 12 alcanzando solo 3 ppm y 5 ppm respectivamente, mientras que el ensayo 10 alcanza una concentración de 123 ppm a los 3 minutos de ensayo. Es posible que el filtro utilizado para las

concentraciones de SO₂ en el ensayo 10 haya estado sucio dada las altas concentraciones de este compuesto.

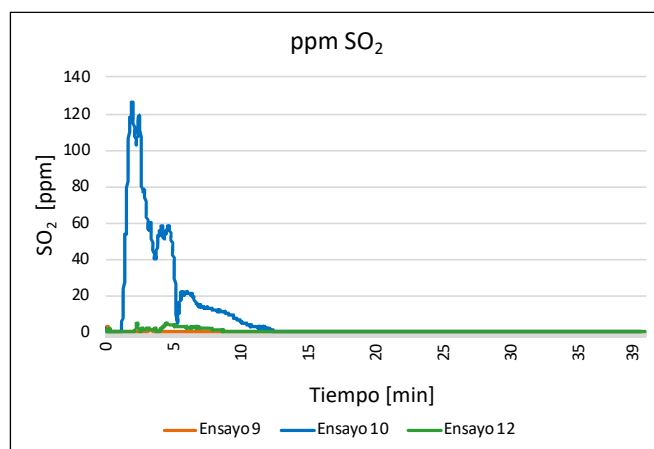


Gráfico 37: Concentraciones de SO₂ en función del tiempo ensayos de combustión 9, 10 y 12.

5.2.4. Factores de emisión en ensayos de combustión

Los factores de emisión de CO₂, CO, SO₂, NO, NO_x y HC en los ensayos de combustión (EC9, EC10 y EC12) se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13: Resumen de factores de emisión [mg/kg] de CO₂, CO, SO₂, NO, NO_x y HC.

Ensayo combustión	Factores de emisión [mg/kg]					
	CO ₂	CO	SO ₂	NO	NO _x	HC
EC9 (Leña certificada)	315078	8759	2	103	163	3238
EC10 (Leña lavada)	372927	15039	559	122	192	2908
EC12 (leña lavada)	361594	8980	24	63	96	3546

En el Gráfico 38 se puede observar que los factores de emisión de CO₂ en los ensayos 10 y 12 (leña lavada) son superiores al ensayo 9 (leña certificada) en un 18,4% y 14,8% respectivamente.

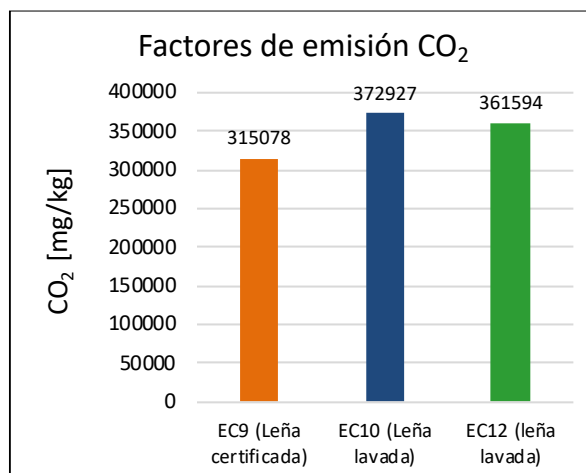


Gráfico 38: Factores de emisión de CO₂ [mg/kg].

Los factores de emisión del CO se representan en el Gráfico 39, en donde el FE del ensayo 9 (leña certificada) es parecido al del ensayo 12 (leña lavada) y se tiene un factor de emisión un 67,5% superior en el ensayo 10.

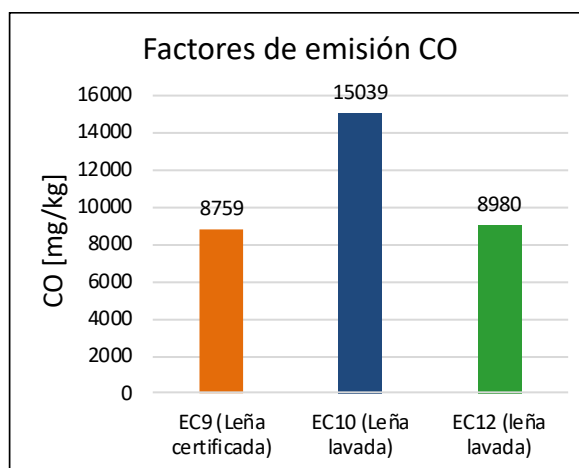


Gráfico 39: Factores de emisión de CO [mg/kg].

En el Gráfico 40 se presentan los factores de emisión de los NO_x (principalmente NO y NO₂) y en el Gráfico 41 los factores de emisión del óxido nitroso (NO) y al comparar los valores en ambos gráficos se puede afirmar que los óxidos nitrosos se componen principalmente de NO. Los valores de NO_x alcanzaron factores de emisión de 192 [mg/kg] en el ensayo 10 (leña lavada), 96 [mg/kg] en el ensayo 11 (leña lavada) y 163 [mg/kg] en el ensayo 9 (leña no lavada).

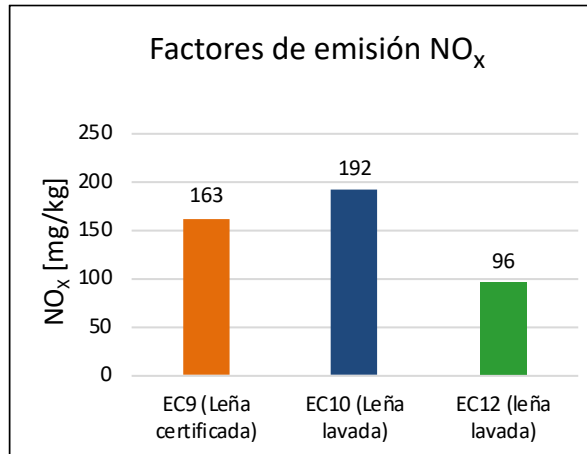


Gráfico 40: Factores de emisión de NO_x [mg/kg].

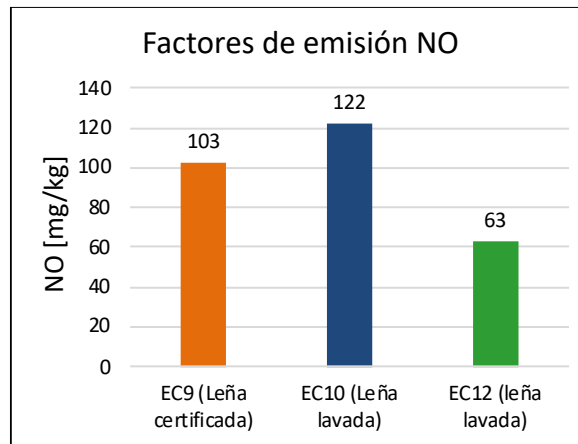


Gráfico 41: Factores de emisión de NO [mg/kg].

Los factores de emisión del dióxido de azufre se ven representados en el Gráfico 42, como se puede observar, los gases de combustión del ensayo 10 presentan valores altos de este compuesto, cuyo F.E es de 559 [mg/kg] y al compararlo con los factores de emisión de 7 [mg/kg] y 24 [mg/kg] de los ensayos 9 y 11 respectivamente, se puede suponer que los datos de medición del ensayo 10 son erróneos. Comparando los factores de emisión del SO₂ de los ensayos 9 y 11, los valores son menores para el caso de la leña no lavada.

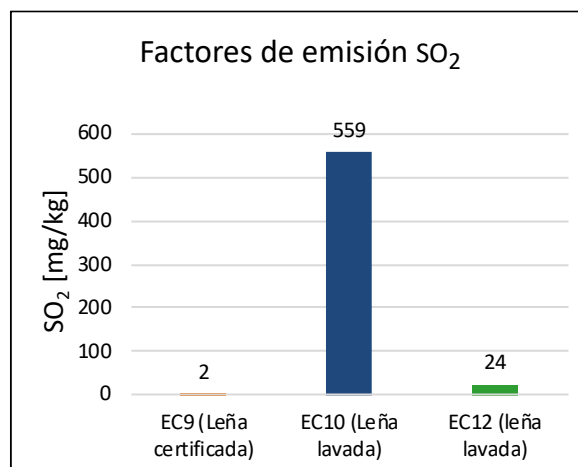


Gráfico 42: Factores de emisión de SO₂ [mg/kg].

En el Gráfico 43 se ven representados los factores de emisión de HC, los cuales corresponden a 3238 [mg/kg], 2908 [mg/kg] y 3546 [mg/kg] para los ensayos 9, 10 y 12 respectivamente. Al comparar los factores de emisión de HC entre los ensayos no se observan variaciones significativas entre la leña certificada (sin lavar) y leña lavada.

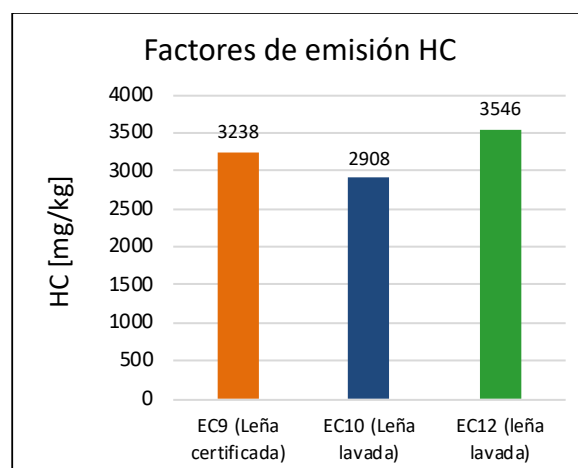


Gráfico 43: Factores de emisión de HC [mg/kg].

6. Conclusiones

De la investigación experimental se concluye que se realizó un protocolo de lavado de leña de *Eucalyptus globulus* el cual permitió extraer compuestos de la leña mediante un proceso de lixiviación utilizando agua desionizada a temperatura ambiente; para lograr optimizar el protocolo se realizaron 7 ensayos de lavado de leña midiendo parámetros como el *pH* y conductividad eléctrica del agua de lavado, con los cuales se concluyó que para lavar la especie *Eucalyptus globulus* se debe realizar un lavado de un ciclo de 97 días aproximadamente y también se puede acelerar el proceso mediante un ensayo por etapas, con 4 ciclos de 168 horas (28 días en total), con el que se logran resultados de lavado similares a los de un ciclo largo. Los minerales extraídos identificados en la solución de lavado del proceso de lixiviación del ensayo por ciclos son en orden decreciente K, P, Na, Mg, N, Ca, Mn, Al y Cr, los cuales también son mencionados en la literatura.

Luego del proceso de lavado y posterior secado de los leños se logró realizar 4 ensayos de combustión monitoreando la temperatura, masa, velocidad, y concentraciones de los gases de escape producto de la combustión de la leña, los cuales fueron diluidos en el túnel de dilución implementado en el LER. Se realizó un ensayo de combustión de leña certificada (sin lavar) de *Eucalyptus globulus* y tres ensayos de combustión leña lavada de *Eucalyptus globulus*, intentando replicar las condiciones lo más parecidas posibles, sin embargo, existieron errores en las mediciones tanto de los instrumentos como errores humanos. Para el caso del decaimiento de masa los resultados no son confiables debido a la variación de masa que se producía por el apoyo de la chimenea de escape en la abrazadera y al mal comportamiento de la balanza al momento de tarar. La temperatura promedio alcanzada en los 15 puntos de medición de los termopares fue levemente mayor en el ensayo de leña certificada (sin lavar), pero solo se lograron realizar mediciones durante los primeros 17 minutos del ensayo.

Con las mediciones realizadas en los ensayos de combustión se caracterizaron las emisiones de los gases de escape bajo las condiciones de leña certificada-estufa convencional y leña lavada-estufa convencional. Los factores de emisión calculados para el CO₂, CO y SO₂ resultaron ser menores en el ensayo de leña certificada (sin

lavar) en comparación con los ensayos de leña lavada, mientras que para los NO_x, NO y HC los resultados no son concluyentes al considerar ambos tipos de leña. Los factores de emisión del CO₂ son elevados, sin embargo, este gas se considera carbononeutral en la quema de leña, ya que, es captado por los árboles en el proceso de fotosíntesis.

Con los resultados obtenidos en la caracterización de emisiones de la presente investigación se considera que el uso de leña lavada de *Eucalyptus globulus* no es favorable para la combustión en estufas residenciales. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que a nivel general el uso de leña lavada sea beneficioso en la combustión residencial sobre las emisiones de contaminantes atmosféricos, ya que, en los ensayos de combustión se ven involucrados diferentes parámetros, en los cuales existieron errores de medición, y en esta investigación no se realizaron suficientes réplicas de los ensayos para determinar con mayor certeza los efectos relacionados al lavado de leña de la especie estudiada. Además, los factores de emisión de los gases pueden variar entre distintas especies de leña lavada combustionada, por lo que se requieren ensayos en otras especies para evaluar de mejor forma el uso de leña lavada en la combustión residencial de leña.

Bibliografía

- BOSCA Chile S.A. (2017). *Manual de Usuario calefactores de leña BOSCA. 00003(Eco 360)*.
- Bruno Vettraino, Maddalena Carlino, S. R. (n.d.). *Chimeneas térmicas. Chimeneas y estufas domésticas para producir calor con madera*.
- Cabrera. (2019). *Balance energético en el primer ciclo de corta de tres especies de eucalipto con diferentes niveles de manejo en el secano Mediterráneo de Chile central*.
- CDT. (2015). *Medición del consumo nacional de leña y combustibles*.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2005). *Termodinámica Iv. Monografía De Enseñanza De La Ingeniería Térmica Y De Fluídos*, 773.
- CNE. (2007). *Proyectos de Biomasa - Guía para Evaluación Ambiental Energías Renovables No Convencionales*.
http://antiguo.cne.cl/cnewww/export/sites/default/05_Public_Estudios/descargas/GuiaBiomasaEIA.pdf
- CONAF. (2022). *Bosques en Chile*. <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/>
- Fredes, N. (2014). Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la Región de Los Lagos. *Nuevos Sistemas de Comunicación e Información*, 2013–2015.
- García Hortal, J. A. (1993). *Constituyentes fibrosos de pastas y papeles : morfología, análisis microscópico* (p. [8], 186).
http://cataleg.ub.edu/record=b1373321~S1*cat
- Guerrero, F. (2017). Determinación de trazadores moleculares, cocientes de concentración y factores de emisión para contaminantes seleccionados generados por la combustión de Eucalyptus Globulus, Nothofagus Oblicua y Pinus Radiata en una cámara de combustión controlada 3C-Emi. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- In-Data SpA & CDT. (2019). *Resumen ejecutivo de usos de la energía de los hogares Chile 2018*. 9.
- Instituto Forestal. (2020). *Características De Crecimiento Y Defectos De Procesamiento Mecánico Y Secado De La Madera De Pino Radiata*.
- K.R. Smith. (2006). El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. *Unasylva*, 57(224).
- Ministerio de Energía. (2014). *Guía práctica para el buen uso de la leña*.

- Ministerio de Energía. (2015). Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción. *Gobierno de Chile.*, 110. http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/2016/03/politica_lena_2016_web.pdf
- Ministerio de Energía. (2021a). *Estrategia Nacional de Calor y Frío Resumen ejecutivo.*
- Ministerio de Energía. (2021b). *Informe Balance Nacional de Energía 2019.*
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Establece norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustioneen o puedan combustionar leña y pellet de madera.* 121–127.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Los beneficios de la calefacción con pellets.*
- MMA. (2016). Guía de calidad del aire y educación ambiental. *Ministerio Del Medio Ambiente*, 1–103. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>
- MMA. (2021). *Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente.* 244–265.
- Pettersen, R. (1984). The chemistry of solids. *Nature*, 116(2921), 610–613. <https://doi.org/10.1038/116610a0>
- Rosales, C. (2019). *Características de combustibles.* 1–18.
- Rowell, R. M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. In *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition* (Issue February 2005). <https://doi.org/10.1201/b12487>
- Schmidt, G., Trouvé, G., Leyssens, G., Schönnenbeck, C., Brillard, A., Olya, M. E., Dewaele, D., & Cazier, F. (2020). Influence and modelling of wood washing on mineral and organic compositions of three woods (beech, fir and oak). *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.03.008>
- Schmidt, G., Trouvé, G., Leyssens, G., Schönnenbeck, C., Genevray, P., Cazier, F., Dewaele, D., Vandenbilcke, C., Faivre, E., Denance, Y., & Le Dreff-Lorimier, C. (2018). Wood washing: Influence on gaseous and particulate emissions during wood combustion in a domestic pellet stove. *Fuel Processing Technology*, 174(October 2017), 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.020>
- UNE-EN. (2003). *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para lixiviación de residuos granulares y lodos.*

ANEXOS

Anexo 1: [%] de disminución de *pH* y aumento de conductividad eléctrica diarios durante los primeros 47 días de los ensayos 5 y 7 de combustión.

Tiempo acumulado [días]	Ensayo 7				Ensayo 5			
	<i>pH</i>	Disminución de <i>pH</i> [%]	conductividad [μ S/cm]	Aumento de conductividad [%]	<i>pH</i>	Disminución de <i>pH</i> [%]	conductividad [μ S/cm]	Aumento de conductividad [%]
0	5,8	0	3	0	5,2	0	21	0
1	5,2	10,345	98	3166,667	4,7	9,615	224	966,667
2	4,89	5,962	179	82,653	4,6	2,128	318	41,964
3	4,75	2,863	225	25,698	4,4	4,348	392	23,270
4	4,76	-0,211	260	15,556	4,4	0,000	449	14,541
5	4,7	1,261	292,27	12,412	4,4	0,000	487	8,463
6	4,71	-0,213	322	10,172	4,4	0,000	524	7,598
7	4,71	0,000	349	8,385	4,4	0,000	559	6,679
8	4,73	-0,425	369	5,731	4,4	0,000	586	4,830
9	4,75	-0,423	395	7,046	4,4	0,000	611	4,266
10	4,76	-0,211	417	5,570	4,4	0,000	629	2,946
11	4,79	-0,630	438	5,036	4,4	0,000	652	3,657
12	4,8	-0,209	455	3,881	4,4	0,000	670	2,761
13	4,8	0,000	474	4,176	4,4	0,000	691	3,134
14	4,8	0,000	492	3,797	4,4	0,000	708	2,460
15	4,8	0,000	508	3,252	4,4	0,000	721	1,836
16	4,82	-0,417	520	2,362	4,4	0,000	735	1,942
17	4,83	-0,207	538	3,462	4,4	0,000	749	1,905
18	4,83	0,000	553	2,788	4,5	-2,273	759	1,335
19	4,86	-0,621	576	4,159	4,5	0,000	777	2,372
20	4,88	-0,412	588	2,083	4,5	0,000	788	1,416
21	4,85	0,615	610	3,741	4,5	0,000	793	0,635
22	4,83	0,412	623	2,131	4,5	0,000	811	2,270
23	4,83	0,000	638	2,408	4,5	0,000	823	1,480
24	4,82	0,207	652	2,194	4,5	0,000	838	1,823
25	4,81	0,207	666	2,147	4,5	0,000	846	0,955
26	4,82	-0,208	678	1,802	4,5	0,000	857	1,300
27	4,79	0,622	691	1,917	4,5	0,000	871	1,634
28	4,79	0,000	703	1,737	4,5	0,000	884	1,493
29	4,77	0,418	720	2,418	4,5	0,000	893	1,018
30	4,74	0,629	735	2,083	4,5	0,000	903	1,120
31	4,72	0,422	770	4,762	4,5	0,000	911	0,886
32	4,7	0,424	786	2,078	4,6	-2,222	918	0,768
33	4,68	0,426	791	0,636	4,6	0,000	935	1,852
34	4,64	0,855	808	2,149	4,6	0,000	945	1,070
35	4,57	1,509	821	1,609	4,6	0,000	957	1,270
36	4,6	-0,656	829	0,974	4,6	0,000	960	0,313
37	4,6	0,000	844	1,809	4,6	0,000	970	1,042
38	4,6	0,000	852	0,948	4,6	0,000	980	1,031
39	4,59	0,217	865	1,526	4,6	0,000	992	1,224
40	4,59	0,000	877	1,387	4,6	0,000	996	0,403
41	4,57	0,436	890	1,482	4,6	0,000	1002	0,602
42	4,57	0,000	902	1,348	4,6	0,000	1016	1,397
43	4,55	0,438	910	0,887	4,6	0,000	1028	1,181
44	4,54	0,220	921	1,209	4,6	0,000	1051	2,237
45	4,54	0,000	930	0,977	4,6	0,000	1043	-0,761
46	4,54	0,000	940	1,075	4,6	0,000	1045	0,192
47	4,53	0,220	949	0,957	4,6	0,000	1054	0,861

Anexo 2: [%] de disminución de *pH* y aumento de conductividad eléctrica diarios a partir de los 48 días del ensayo 7 de combustión.

Tiempo acumulado [días]	Ensayo 7			
	<i>pH</i>	Disminución de <i>pH</i> [%]	conductividad [μ S/cm]	Aumento de conductividad [%]
48	4,53	0,000	960	1,159
49	4,52	0,221	970	1,042
50	4,52	0,000	978	0,825
51	4,52	0,000	995	1,738
52	4,51	0,221	1000	0,503
53	4,51	0,000	1010	1,000
54	4,51	0,000	1018	0,792
55	4,5	0,222	1027	0,884
56	4,49	0,222	1034	0,682
57	4,49	0,000	1040	0,580
58	4,49	0,000	1046	0,577
59	4,5	-0,223	1059	1,243
60	4,49	0,222	1067	0,755
61	4,49	0,000	1068	0,094
62	4,49	0,000	1068	0,000
63	4,47	0,445	1086	1,685
64	4,47	0,000	1095	0,829
65	4,46	0,224	1102	0,639
66	4,46	0,000	1107	0,454
67	4,46	0,000	1114	0,632
68	4,46	0,000	1120	0,539
69	4,45	0,224	1131	0,982
70	4,45	0,000	1140	0,796
71	4,45	0,000	1146	0,526
72	4,46	-0,225	1150	0,349
73	4,46	0,000	1157	0,609
74	4,46	0,000	1164	0,605
75	4,46	0,000	1168	0,344
76	4,46	0,000	1172	0,342
77	4,45	0,224	1181	0,768
78	4,44	0,225	1188	0,593
79	4,44	0,000	1193	0,421
80	4,44	0,000	1199	0,503
81	4,44	0,000	1204	0,417
82	4,44	0,000	1208	0,332
83	4,46	-0,450	1213	0,414
84	4,45	0,224	1218	0,412
85	4,46	-0,225	1220	0,164
86	4,46	0,000	1227	0,574
87	4,44	0,448	1232	0,407
88	4,44	0,000	1236	0,325
89	4,44	0,000	1240	0,324
90	4,44	0,000	1241	0,081
91	4,43	0,225	1244	0,242
92	4,43	0,000	1248	0,322
93	4,44	-0,226	1251	0,240
94	4,45	-0,225	1256	0,400
95	4,45	0,000	1259	0,239
96	4,45	0,000	1262	0,238
97	4,44	0,225	1267	0,396

Anexo 3: Bitácora de registro de datos y eventos de los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.

Bitácora ensayos de combustión

Ensayo 9

Configuración: Leña certificada-estufa con vermiculita

Fecha: 22-03-2022

Factor de dilución: x1.

Se realiza periodo de ignición y periodo de ensayo

En la carga de ensayo se utiliza leña de *Eucalyptus globulus* proveniente de Bosques del Norte S.A.

Carga ensayo= 2112 [g]

Carga ignición= 1784 [g]

Carga remanente= 422 a 528 [g]

Hora inicio ignición: 11:33

Hora fin ignición: 11:56

Hora inicio ensayo: 11:57:05

Hora fin ensayo: 12:36:49

En la Tabla 1 se pueden observar los datos del contenido de humedad relativa (HR) de los leños (*Eucalyptus globulus* proveniente de Bosques del Norte S.A) utilizados como “carga ensayo”.

Tabla 14: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados para “carga ensayo”.

Humedad relativa [%]		
Nº medición	Leño 1	Leño 2
1	13,8	12,7
2	12,2	12,8
3	13,7	12,0
4	12,3	13,7
HR promedio [%]	13,0	12,8
Masa [g]	914	1198

La carga de ignición corresponde a 1602 [g] de leña trozada (*Eucalyptus globulus* proveniente de bosques del norte) y 182 [g] de cartón, hojas secas y ramas.

La medición de gases se realiza de forma continua durante todo el periodo de ensayo.

A los 10 minutos del periodo de ignición se tomaron mediciones de velocidad y temperatura con termoanemómetro de punta incandescente D8060048. El registro se observa en la Tabla 2:

Tabla 15: Mediciones de velocidad y temperatura de los gases de escape.

Nº medición	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]
1	1,29	45,6
2	1,20	45,7
3	0,89	45,3
4	1,10	47,6
5	1,00	47,4
Promedio	1,1	46,3

A continuación, se registran los acontecimientos durante el periodo de ignición y el periodo de ensayo. Los datos de masa corresponden al registro visto en la báscula de mesa.

11:24 Masa= 105,12 [kg] (Sistema estufa + caño (sin carga)). **Luego se tara.**

11:25 Se comienza a cargar la estufa con “carga ignición”.

11:29 Masa= 2,0 [kg] (carga ignición).

11:31 Se enciende el ventilador al máximo.

11:31 Masa= 2,10 [kg] (carga ignición con ventilador encendido).

11:33 Masa=2,52 [kg]. Encendido de carga de ignición.

11:38 Se pasa el tiraje a mínima admisión de aire.

11:55 Se abre la puerta de la estufa para atizar brasas. **Se tara.**

11:57 Ingresar sonda del TESTO 350 al túnel de dilución. Se carga con “carga ensayo”. Se cierra la puerta.

12:14 Transcurridos 17 minutos desde el inicio del ensayo la báscula registró 0 kg. Sin embargo, sigue combustible sin ser quemado.

12:23 No se observa registro en los sensores de temperatura (no sabemos si sigue midiendo).

En la Tabla 3 se tienen los registros manuales de la masa en función del tiempo acumulado. Se registran datos cada 1 minuto.

Tabla 16: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado para los periodos de ignición y ensayo.

Hora	Tiempo acumulado [s]	Masa [kg]
11:33	0	2,52
11:34	1	3,01
11:35	2	2,77
11:36	3	3,5
11:37	4	3,45
11:38	5	3,03
11:39	6	3,31
11:40	7	3,06
11:41	8	3,41
11:42	9	3,61
11:43	10	3,64
11:44	11	3,41
11:45	12	3,21
11:46	13	3,27
11:47	14	3,27
11:48	15	3,4
11:49	16	3,12
11:50	17	2,93
11:51	18	2,61
11:52	19	2,63
11:53	20	2
11:54	21	1,07
11:55	22	0,37
11:56	23	0,37
11:57	24	0,9
11:58	25	2
11:59	26	2
12:00	27	2,78
12:01	28	3,11
12:02	29	3,08
12:03	30	2,73
12:04	31	2,28
12:05	32	2,83
12:06	33	3,02
12:07	34	2,5
12:08	35	2,32
12:09	36	1,82
12:10	37	1,7
12:11	38	1,41
12:12	39	1,13
12:13	40	0,78

12:14	41	0,25
12:15	42	-0,12
12:16	43	-0,42
12:17	44	-0,34
12:18	45	-0,43
12:19	46	-0,09
12:20	47	-0,35
12:21	48	-0,38
12:22	49	-0,61
12:23	50	-0,69
12:24	51	-0,74
12:25	52	-0,76
12:26	53	-0,82
12:27	54	-0,82
12:28	55	-0,62
12:29	56	-0,65
12:30	57	-0,81
12:31	58	-0,87
12:32	59	-0,8
12:33	60	-0,64
12:34	61	-0,54
12:35	62	-0,38
12:36	63	-0,5
12:37	64	-0,7

Ensayo 10

Configuración: Leña lavada-estufa con vermiculita n=1.

Fecha: 22-03-2022

Factor de dilución: x1.

Se realiza periodo de ignición y periodo de ensayo

En la carga de ensayo se utiliza leña lavada de *Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio.

Carga ensayo= 2064 [g].

Carga ignición= 1750 [g].

Carga remanente= 413 a 516 [g].

Hora inicio periodo ignición: 14:50

Hora fin periodo ignición: 15:22

Hora inicio periodo ensayo: 15:22:52

Hora fin periodo ensayo: 16:02:33

En la Tabla 4 se pueden observar los datos del contenido de humedad relativa de los leños (*Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio) utilizados como “carga ensayo”.

Tabla 17: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados para “carga ensayo”.

Humedad relativa [%]		
Nº medición	leño 10	leño 15
1	10,1	10,5
2	9,6	9,8
3	11,2	11,7
4	10,0	12,3
HR promedio [%]	10,2	11,10
Masa [g]	1025	1039

La carga de ignición corresponde a 1572 [g] de leña trozada (proveniente del ensayo 4 de leño-limpio) y 178 g de cartón, hojas secas y ramas.

La medición de gases se realiza de forma continua durante todo el periodo de ensayo.

A los 10 minutos del periodo de ignición se tomaron mediciones de velocidad y temperatura con el termoanemómetro de punta incandescente D8060048. El registro se observa en la Tabla 5:

Tabla 18: Registro de velocidad y temperatura de los gases de escape.

Nº medición	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]
1	1,14	41,5
2	1,54	45,8
3	1,45	45,5
4	1,51	43,5
5	1,48	44,8
Promedio	1,42	44,2

A continuación, se registran los acontecimientos durante el periodo de ignición y periodo de ensayo. Los datos de masa corresponden al registro visto en la báscula de mesa.

14:43 Se comienza a tomar medición de temperaturas. Se enciende ventilador. Se posiciona en la balanza el sistema estufa+caño.

14:45 Masa= 105,15 kg (sistema estufa+caño). **Se tara.** Se carga estufa con “carga ignición”.

14:50 Encendido carga de ignición. Se cierra la puerta de la estufa.

14:56 Se posiciona el tiraje a mínima admisión de aire.

15:01 Se mide velocidad y temperatura con termoanemómetro.

15:22 Se atizan las brasas. Masa= 0,43 kg. Se carga estufa con “carga ensayo”. Se cierra la puerta. Ingresa la sonda del TESTO al túnel de dilución.

En la Tabla 6 se tienen los registros manuales de la masa en función del tiempo acumulado. Se registran datos cada 1 minuto.

Tabla 19: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado para los periodos de ignición y ensayo.

Hora	Tiempo acumulado [s]	Masa [kg]
14:50	0	1,6
14:51	1	1,73
14:52	2	2,06
14:53	3	2,66
14:54	4	2,57
14:55	5	2,03
14:56	6	2,21
14:57	7	2,49
14:58	8	2,68
14:59	9	2,33
15:00	10	1,84
15:01	11	1,91
15:02	12	1,78
15:03	13	1,73
15:04	14	1,49
15:05	15	1,33
15:06	16	1,36
15:07	17	1,22
15:08	18	0,98
15:09	19	0,91
15:10	20	0,62
15:11	21	0,79
15:12	22	0,68
15:13	23	0,58
15:14	24	0,64
15:15	25	0,61
15:16	26	0,59
15:17	27	0,67
15:18	28	0,64

15:19	29	0,55
15:20	30	0,43
15:21	31	0,42
15:22	32	0,48
15:23	33	3,42
15:24	34	4,34
15:25	35	4,93
15:26	36	5,38
15:27	37	6,45
15:28	38	6,98
15:29	39	6,99
15:30	40	5,85
15:31	41	3,57
15:32	42	2,35
15:33	43	3,1
15:34	44	2,84
15:35	45	1,95
15:36	46	1,92
15:37	47	1,86
15:38	48	1,2
15:39	49	0,81
15:40	50	1,01
15:41	51	1,04
15:42	52	1
15:43	53	0,93
15:44	54	0,64
15:45	55	0,68
15:46	56	0,45
15:47	57	0,34
15:48	58	0,29
15:49	59	0,43
15:50	60	0,34
15:51	61	0,32
15:52	62	0,36
15:53	63	0,32
15:54	64	0,39
15:55	65	0,43
15:56	66	0,42
15:57	67	0,25
15:58	68	0,28
15:59	69	0,36
16:00	70	0,27
16:01	71	0,26
16:02	72	0,28

Ensayo 11

Configuración: Leña lavada-estufa con vermiculita n=2.

Fecha: 30-03-2022

Factor de dilución: x1.

Se realiza periodo de ignición y periodo de ensayo.

En la carga de ensayo se utiliza leña lavada de *Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio.

Carga ensayo= 1968 [g]

Carga ignición= 1734 [g]

Carga remanente= 394 a 492 [g]

Hora inicio periodo ignición: 12:09

Hora fin periodo ignición: 12:42

Hora inicio periodo ensayo: 12:43:54

Hora fin periodo ensayo: 13:23:38

En la Tabla 7 se tienen los datos del contenido de humedad relativa de los leños (*Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio) utilizados como “carga ensayo”.

Tabla 20: Contenido de humedad relativa de los leños utilizados como “carga ensayo”.

Humedad relativa [%]		
Nº medición	leño 12	leño 14
1	12,9	12,9
2	13,6	9,4
3	11,1	12,0
4	10,7	10,9
HR promedio [%]	12,1	11,3
Masa [g]	888	1080

La carga de ignición corresponde a 1532 [g] de leña (proveniente del leño 3 del ensayo 2 de leño-limpio) y 202 [g] de cartón, hojas y ramas.

La medición de gases se realiza de forma continua durante todo el periodo de ensayo.

A continuación, se registran los acontecimientos durante el periodo de ignición y periodo de ensayo. Los datos de masa corresponden al registro visto en la báscula de mesa.

12:04 Masa=104,59 [kg] (Sistema estufa+caño). **No se tara.**

12:04 Se carga estufa con carga ignición. Masa=106,24 [kg].

12:09 Comienza encendido. Masa=106,22 [kg].

12:14 Se mueve el tiraje a posición mínima.

12:41 Se comienzan mediciones con TESTO 350. Masa=105,86 [kg].

12:41 Se atizan las brasas. Se carga estufa con carga de ensayo. Masa=107,8 [kg].

12:42 Ingresa sonda del TESTO 350. El TESTO no está midiendo CO₂.

13:23 Se detuvo el TESTO 350. Se termina el ensayo. Masa=105,91 [kg].

Durante el ensayo hubo problemas con medición del TESTO 350 (entrega datos erróneos). Se registraron masas y temperaturas.

En la Tabla 8 se tienen los registros manuales de la masa en función del tiempo acumulado. Se registran datos cada 1 minuto.

Tabla 21: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado del periodo de ignición y ensayo.

Hora	Tiempo acumulado [s]	Masa [kg]
12:09	0	106,22
12:10	1	106,25
12:11	2	106,44
12:12	3	106,51
12:13	4	106,53
12:14	5	106,54
12:15	6	106,66
12:16	7	106,74
12:17	8	106,76
12:18	9	106,82
12:19	10	106,84
12:20	11	106,85
12:21	12	106,75
12:22	13	106,73
12:23	14	106,72
12:24	15	106,68
12:25	16	106,72
12:26	17	106,67
12:27	18	106,61
12:28	19	106,56

12:29	20	106,55
12:30	21	106,53
12:31	22	106,51
12:32	23	106,42
12:33	24	106,34
12:34	25	106,17
12:35	26	106,05
12:36	27	106,02
12:37	28	106,05
12:38	29	106
12:39	30	105,94
12:40	31	105,82
12:41	32	105,95
12:42	33	107,8
12:43	34	107,77
12:44	35	107,73
12:45	36	107,73
12:46	37	107,7
12:47	38	107,7
12:48	39	107,71
12:49	40	107,7
12:50	41	107,7
12:51	42	107,75
12:52	43	107,63
12:53	44	107,62
12:54	45	107,48
12:55	46	107,45
12:56	47	107,41
12:57	48	107,36
12:58	49	107,26
12:59	50	107,23
13:00	51	107,17
13:01	52	107,16
13:02	53	107,08
13:03	54	107,02
13:04	55	107
13:05	56	106,93
13:06	57	106,8

13:07	58	106,72
13:08	59	106,72
13:09	60	106,7
13:10	61	106,63
13:11	62	106,61
13:12	63	106,59
13:13	64	106,55
13:14	65	106,5
13:15	66	105,33
13:16	67	106,18
13:17	68	106,13
13:18	69	106,13
13:19	70	106,08
13:20	71	106
13:21	72	105,97
13:22	73	105,93

Ensayo 12

Configuración: Leña lavada-estufa con vermiculita n=3.

Fecha: 30-03-2022

Factor de dilución: x1.

Se realiza periodo de ignición y periodo de ensayo

En la carga de ensayo se utiliza leña lavada de *Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio.

Carga ensayo= 2009 [g]

Carga ignición= 1587 [g]

Carga remanente= 402 a 502 [g]

Hora inicio periodo ignición: 15:06

Hora fin periodo ignición: 15:33

Hora inicio periodo ensayo: 15:34

Hora fin periodo ensayo: 16:14

En la Tabla 9 se pueden observar los datos del contenido de humedad y masa de los leños (*Eucalyptus globulus* proveniente del ensayo 6 de leño-limpio) utilizados como “carga ensayo”.

Tabla 22: Contenido de humedad relativa y masa de los leños utilizados como carga de ensayo.

Humedad relativa [%]		
Nº medición	leño 6	leño 13
1	12,9	15,4
2	12,9	13,1
3	9,3	11,2
4	9,0	9,8
HR promedio [%]	11,0	12,4
Masa [g]	760	1249

La carga de ignición corresponde a 1452 [g] de leña (proveniente del leño 7 del ensayo 1 de leño-limpio) y 135 [g] de cartón, hojas y ramas.

La medición de gases se realiza de forma continua durante todo el periodo de ensayo.

El panel de control se utiliza en L1.

A continuación, se registran los acontecimientos durante el periodo de ignición y periodo de ensayo. Los datos de masa corresponden al registro visto en la báscula de mesa.

15:03 Masa=103,3 [kg] (Sistema estufa+caño). **No se tara.**

15:04 Se carga estufa con carga ignición. Masa=105,00 [kg].

15:06 Inicio periodo de ignición. Masa=105,04 [kg].

15:12 Se pasa el tiraje a mínima admisión de aire.

15:33 Se agrega la carga de ensayo e ingresa la sonda del TESTO 350 al ducto.

15:34 Masa=107,45 [kg].

16:14 Se da por terminado el periodo de ensayo cumplidos 40 minutos. Sin embargo, la llama aún no se apaga y se siguen midiendo los gases.

16:15 Se apaga la llama.

16:19 Se terminan las mediciones con el TESTO 350.

En este ensayo la distancia del sensor se ajusta para que tome mediciones en el centro del ducto.

En la Tabla 10 se tienen los registros manuales de la masa en función del tiempo acumulado. Se registran datos cada 1 minuto.

Tabla 23: Registro manual de la masa en función del tiempo acumulado del periodo de ignición y ensayo.

Hora	Tiempo acumulado [s]	Masa [kg]
15:06	0	105,04
15:07	1	105,04
15:08	2	105,15
15:09	3	105,18
15:10	4	105,29
15:11	5	105,41
15:12	6	106,29
15:13	7	106,32
15:14	8	106,39
15:15	9	106,46
15:16	10	106,47
15:17	11	106,46
15:18	12	106,39
15:19	13	106,36
15:20	14	106,31
15:21	15	106,3
15:22	16	106,19
15:23	17	106,16
15:24	18	106,11
15:25	19	105,92
15:26	20	105,87
15:27	21	105,82
15:28	22	105,73
15:29	23	105,7
15:30	24	105,62
15:31	25	105,59
15:32	26	105,55
15:33	27	105,49
15:34	28	107,45
15:35	29	107,4
15:36	30	107,42
15:37	31	107,36
15:38	32	107,36
15:39	33	107,32

15:40	34	107,32
15:41	35	107,2
15:42	36	107,11
15:43	37	107,11
15:44	38	107,07
15:45	39	107
15:46	40	106,88
15:47	41	106,8
15:48	42	106,76
15:49	43	106,75
15:50	44	106,79
15:51	45	106,68
15:52	46	106,66
15:53	47	106,56
15:54	48	106,48
15:55	49	106,34
15:56	50	106,14
15:57	51	106,13
15:58	52	106,04
15:59	53	106
16:00	54	105,93
16:01	55	105,92
16:02	56	105,86
16:03	57	105,82
16:04	58	105,79
16:05	59	105,75
16:06	60	105,68
16:07	61	105,63
16:08	62	105,61
16:09	63	105,62
16:10	64	105,52
16:11	65	105,48
16:12	66	105,6
16:13	67	105,59
16:14	68	
16:15	69	105,47

Anexo 4: Tabla resumen de las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas en los ensayos de combustión 9, 10, 11 y 12.

Termocupla	Ensayo 9		Ensayo 10		Ensayo 11		Ensayo 12	
	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]
T ₁ : Fondo derecho (vermiculita).	373	458	272	437	282	401	290	433
T ₂ : Fondo izquierdo (vermiculita).	400	511	296	489	294	416	291	452
T ₃ : Lado derecho – fondo (vermiculita).	366	449	262	430	279	431	289	438
T ₄ : Lado derecho – frente (vermiculita).	359	441	264	440	275	409	292	448
T ₅ : Lado izquierdo – fondo (vermiculita).	383	473	285	467	284	404	284	437
T ₆ : Lado derecho – frente (vermiculita).	351	439	265	434	269	376	273	412
T ₇ : Gases dentro de cámara – lado derecho.	319	810	232	711	242	786	223	784
T ₈ : Gases dentro de cámara – lado derecho.	302	750	262	846	236	707	223	759
T ₉ : Ducto de gases de escape (por dentro).	258	487	214	506	203	437	179	472
T ₁₀ : Ambiente.	19	20	24	25	23	25	27	28
T ₁₁ : Pared exterior izquierda.	238	279	181	283	180	249	183	265
T ₁₂ : Pared exterior derecha.	232	270	178	265	186	263	196	270
T ₁₃ : Aire primario derecho.	284	405	230	406	225	371	243	421
T ₁₄ : Aire primario izquierdo.	283	398	208	430	213	363	207	397
T ₁₅ : Pared posterior.	214	276	158	259	157	233	158	261