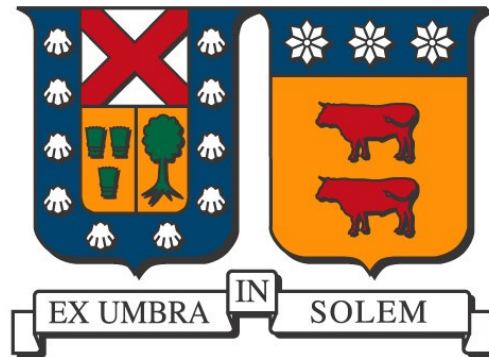


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO - CHILE



# “INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DEL PRETRATAMIENTO DE LAVADO DE LEÑA PARA LA MITIGACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS”

ROBINSON GABRIEL OYARZO HERNÁNDEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : DR. ING. MARIO TOLEDO T.  
PROFESOR CORREFERENTE : DR. FABIÁN GUERRERO C.

4 de abril de 2022



## Agradecimientos

A mis padres Rubelindo e Irma, por su infinito amor y cariño, pues se han sacrificado mucho en ayudarme a cumplir mis metas y anhelos.

A mi hermano, Cristian y mi pareja, Javiera, por su compañía, consejos, apoyo y amor incondicional.

A mis amigos y amigas de la infancia que me han acompañado desde el colegio y la academia la música, gracias por tanto.

A los amigos y amigas conseguidos durante el proceso universitario. Todos y todas me han entregado mucho cariño, compañía y consejos, además de buenas vibras.

Al equipo del proyecto FONDEF, todos son grandes personas de las cuales aprendí mucho. Muy agradecido de conocerlos y que me hayan dado la oportunidad de trabajar a su lado, siempre con buena disposición, además de un ambiente muy cálido y grato para desenvolverse.



## Resumen

El presente trabajo se enmarca en el desarrollo del proyecto FONDEF ID20I10319, el cual busca integrar e implementar un protocolo de pretratamiento de lavado de leña, junto al diseño e innovación de una estufa de calefacción residencial de 10,8 kW mediante la instalación de medios porosos inertes al interior del hogar de combustión. Con esto se busca disminuir o mitigar las emisiones contaminantes generadas por el proceso de combustión de leña.

Es por lo anterior, que este trabajo busca desarrollar experimentos de pretratamiento de lavado de leña en Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) que permitan mitigar contaminantes atmosféricos (gaseosos o particulado). Para lograr esto se tiene considerado primero, identificar especies de madera más representativas en el centro-sur de Chile. A algunas de ellas se les aplicará un protocolo de lavado de leña y posteriormente, deberá analizarse el desempeño de este tipo de combustible en ensayos de combustión determinados.

Para poder identificar las especies de consumo más representativo se consultaron estudios de los últimos 20 años enfocados a caracterizar dicho comportamiento. En el caso del protocolo de lavado, se desarrolló una metodología (de la cual aquí se presentan resultados) gracias a varias pruebas preliminares. Para los ensayos de combustión (basados en la metodología CH-5G), que buscan evaluar la mitigación de contaminantes atmosféricos, se pretendió obtener una comparación en relación a la medición de gases contaminantes generados por leña con y sin pretratamiento de lavado en la estufa de calefacción con medio poroso inerte.

Los resultados muestran que el Roble Hualle (*Nothofagus obliqua*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y la Lengua (*Nothofagus pumilio*) son especies características del consumo residencial de leña en la zona centro-sur de Chile. Además de esto, al aplicar el protocolo de lavado al Eucalipto se observa un menor tiempo de extracción requerido para lograr el equilibrio en la conductividad eléctrica del agua; aquello, en contraste de una mayor cantidad de solvente utilizado. Por otro lado, los ensayos de combustión muestran temperaturas más altas alcanzadas por la leña certificada sin pretratamiento, sin embargo, las diferencias no son tan marcadas. Lo mismo ocurre con las emisiones contaminantes gaseosas, pues los factores de emisión calculados no dejan en claro una mitigación de contaminantes por parte de la leña lavada. A pesar de esto, los hidrocarburos registrados hacen pensar que al estudiar la fracción de material particulado producido al ambiente, se puedan ver reflejados dichos efectos.

Finalmente, debe señalarse que este trabajo de título fue desarrollado durante la pandemia global de covid-19. Es por esto, que la asistencia a los laboratorios se vió disminuida al mínimo y en consecuencia, la planificación del proyecto y la realización de experimentos. Muestra de ello, es que tanto los ensayos con la metodología de pretratamiento de lavado como los de combustión, lograron una baja cantidad de réplicas. Esto implica un mayor error experimental y menor confiabilidad en los datos obtenidos.

**Palabras clave:** Lavado de leña, conductividad eléctrica, compuestos orgánicos, medio poroso inerte, leña, material particulado, emisiones contaminantes, factor de emisión



## Abstract

The present work is part of the development of the FONDEF ID20I10319 project, which seeks to integrate and implement a firewood washing pre-treatment protocol, along with the design and innovation of a 10,8 kW residential heating stove through the installation of inert porous media inside the combustion furnace. Through this process, the aim is to reduce or mitigate the emissions generated by the process of wood combustion.

Due to the above points, this work seeks to develop firewood washing pre-treatment experiments in Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) that allow mitigating atmospheric pollutants (gaseous or particulate). To achieve this, first it is considered, the identification of the most representative wood species in the center-south of Chile. To some of them, a firewood washing protocol will be applied and subsequently, the performance of this type of fuel in certain combustion tests must be analyzed.

In order to identify the most representative species of consumption, studies of the last 20 years focused on characterizing said behavior were consulted. In the case of the washing protocol, a methodology was developed (from which results are presented here) thanks to several preliminary tests. For the combustion tests (based on the CH-5G methodology), which seek to evaluate the mitigation of atmospheric pollutants, it was intended to obtain a comparison in relation to the measurement of polluting gases generated by firewood with and without washing pre-treatment in the stove heating with inert porous medium.

The results show that the Roble Hualle (*Nothofagus obliqua*), Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) and Lenga (*Nothofagus pumilio*) are the most usual species of residential firewood consumption in the central-southern area of Chile. In addition to this, when applying the washing protocol to Eucalyptus, is observed that a shorter extraction time is required to achieve equilibrium in the electrical conductivity of the recorded water; that, in contrast to a greater amount of solvent utilized. By contrast, the combustion tests show higher temperatures reached by certified firewood without pre-treatment. However, the differences are not substantial. Same scenario with the gaseous pollutant emissions, since the calculated emission factors do not reflect mitigation of pollutants by washed firewood, despite this, the registered hydrocarbons suggest that when studying the fraction of particulate matter generated in the environment, these effects can be identified.

Finally, it should be noted that this thesis was performed during the covid-19 global pandemic. Due to this, assistance to the laboratories was reduced to a minimum and, because of said reason, the planning of the project was affected therefore, the performance of tests aswell. Proof of it, is that the tests with the wood washing pre-treatment methodology and the combustion tests, reached a low number of replicates. Increasing the experimental error and decreasing reliability in the data.

**Keywords:** Wood washing, electric conductivity, organic compounds, inert porous medium, firewood, polluting emissions, emission factor.



## Glosario

Aceites Escenciales	Mezcla de sustancias volátiles, en donde predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos).
Celulosa	Es un homopolisacárido rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa.
Extraíbles	Se entienden aquellas sustancias que se extraen de diferentes partes de los árboles de coníferas y latifoliadas mediante agua, disolventes orgánicos, vapor de agua y mediante un exprimido mecánico.
Lignina	Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera.
Material Anisotrópico	Material cuyas propiedades mecánicas varían dependiendo el eje que se estudie.
Lavado de leña	Procedimiento mediante el cual la leña es sumergida en un líquido (de preferencia agua) para extraer compuestos químicos hidrófilos.
Medio Poroso Inerte	Material cuyas propiedades termofísicas mejoran los diferentes mecanismos de transferencia de calor existentes (radiación, convección y convección).
Factor de Emisión	Se define como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante. Estos factores son usualmente expresados como la masa del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración .



## Índice

Índice de figuras	8
Índice de cuadros	11
<b>Introducción</b>	<b>12</b>
Marco de Referencia . . . . .	13
Objetivo General. . . . .	13
Objetivos Específicos. . . . .	13
<b>I Marco Teórico</b>	<b>14</b>
<b>1. Madera</b>	<b>14</b>
1.1. Composición Química . . . . .	15
1.1.1. Poder Calorífico y Humedad Interna . . . . .	18
1.2. Consumo de leña en Chile . . . . .	19
1.2.1. Evolución del consumo. . . . .	19
<b>2. Tecnologías de combustión de Leña</b>	<b>26</b>
2.1. Estufa BOSCA Spirit 380 . . . . .	27
2.2. Normativas de emisiones para estufas de combustión de leña en Chile. . . . .	28
2.3. Medio Poroso Inerte . . . . .	29
<b>3. Emisiones Contaminantes</b>	<b>31</b>
3.1. Gases Producto . . . . .	31
3.2. Material Particulado . . . . .	31
3.2.1. Normativa en Chile . . . . .	32
3.2.2. Contexto País . . . . .	32
3.2.3. Efectos sobre la Salud. . . . .	34
3.2.4. Efectos sobre el Medioambiente. . . . .	35
3.3. Gases Producto de la Combustión . . . . .	36
<b>4. Extracción Química y Antecedentes de Lavado de Biomasa</b>	<b>36</b>
4.1. Extracciones . . . . .	36
<b>II Metodología</b>	<b>41</b>



<b>5. Instrumentos y Equipos Utilizados</b>	<b>42</b>
5.1. Humedad . . . . .	42
5.2. pH y Conductividad Eléctrica . . . . .	43
5.3. Masa . . . . .	44
5.4. Analizador de Gases . . . . .	45
<b>6. Lavado de Leña</b>	<b>46</b>
6.1. Recepción y Selección de Leña . . . . .	46
6.2. Caracterización de Leños . . . . .	46
6.3. Extracción Sólido-Líquido . . . . .	47
6.4. Filtración . . . . .	48
6.5. Secado de Leña . . . . .	50
<b>7. Combustión de leña</b>	<b>50</b>
7.1. Túnel de dilución . . . . .	50
7.2. Diseño Prototipo de Estufa Residencial . . . . .	52
7.3. Monitoreo de Temperaturas . . . . .	52
7.4. Precauciones a tomar antes del ensayo . . . . .	53
7.5. Metodología para combustión . . . . .	54
7.6. Factor de Emisión . . . . .	56
<b>III Resultados Obtenidos</b>	<b>57</b>
<b>8. Lavado de leña</b>	<b>57</b>
8.1. Humedad y Masa de la Leña . . . . .	57
8.2. Temperatura del Agua . . . . .	59
8.3. pH . . . . .	60
8.4. Conductividad Eléctrica . . . . .	62
<b>9. Ensayos de Combustión</b>	<b>64</b>
9.1. Masa . . . . .	64
9.2. Temperatura . . . . .	65
9.3. Contaminantes Gaseosos . . . . .	69
9.3.1. Concentraciones Registradas . . . . .	69
9.3.2. Factor de Emisión . . . . .	71



<b>IV</b>	<b>Análisis de resultados y Recomendaciones</b>	<b>73</b>
	10. Análisis de resultados	73
	11. Recomendaciones	75
	Referencias	76
<b>V</b>	<b>Anexo</b>	<b>78</b>



## Índice de figuras

1.	Partes de la madera. . . . .	14
2.	Estructura de la Celulosa [Fuente: Determinacion de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina, de una plantación proveniente del departamento de Izabal (U. San Carlos de Guatemala)]. . . . .	15
3.	Porcentaje de Celulosa en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)]. . . . .	16
4.	Porcentaje de Hemicelulosa en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)]. . . . .	16
5.	Porcentaje de Lignina en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)]. . . . .	17
6.	Porcentaje de Extraíble (azul) y Ceniza (rojo) presente en árboles de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)]. . . . .	17
7.	Poder calorífico para distintas especies con distintos contenidos de humedad [Fuente: Elaboración propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)]. . . . .	18
8.	Especies consumidas en algunas ciudades de Chile [Fuente: Elaboración propia en base a Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile (Centro de Micro Datos(2006)]. . . . .	20
9.	Consumo regional de combustibles derivados de la madera por sector en 1992 [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))]. . . . .	21
10.	Consumo regional de combustibles derivados de la madera por sector en 2003 [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))]. . . . .	21
11.	Evolución del consumo de combustibles derivados de la madera en Chile [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))]. . . . .	22
12.	Penetración de leña con respecto al total de viviendas tipología en el sector residencial. [Fuente: Elaboración propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)]. . . . .	22
13.	Distribución del consumo por especie en el sector residencial. [Fuente: Elaboracion propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)]. . . . .	23
14.	Promedio de consumo de leña por vivienda, según distintas fuentes. [Fuente: Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).]. . . . .	24
15.	Especies nativas más consumidas como leña por región en Chile. [Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).] . . . . .	25
16.	Especies exóticas más consumidas como leña por región en Chile.[Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).] . . . . .	25
17.	Estufa Spirit 380. . . . .	27
18.	Imagen referencial Bosca Spirit 380. [Fuente: Manual de uso Spirit 380.] . . . . .	27



19.	Esquema del sistema de doble combustión Spirit 380. [Fuente: Manual de uso Spirit 380.] . . .	28
20.	Zonas de combustión al interior del MPI.[Fuente: Silva(2016)] . . . . .	30
21.	Proceso de intercambio de calor en el reactor de MPI [Fuente: Silva (2016)] . . . . .	30
22.	Relación tamaño de cabello humano y material particulado [Fuente: World Air Quality Report 2020 (IQair)]. . . . .	32
23.	Percentil 98 de las concentraciones diarias de $MP_{2,5}$ en estaciones de monitoreo del país el año 2018 [Fuente: Calidad del aire (SINIA MMA)]. . . . .	33
24.	Promedio Trianual de Concentraciones de $MP_{2,5}$ en los años 2016-2018 [Fuente: Calidad del aire (SINIA MMA)]. . . . .	34
25.	Testo 606-2 . . . . .	42
26.	Horiba PC 110 . . . . .	43
27.	Balanzas . . . . .	44
28.	Analizador de gases Testo 350 . . . . .	45
29.	Metodología de lavado de leña [Fuente: Elaboración propia]. . . . .	46
30.	Recepción y etiquetado de leños. . . . .	46
31.	Caracterización de humedad y peso de los leños previamente etiquetados. . . . .	47
32.	Procedimiento de trasvasije y llenado del recipiente. . . . .	47
33.	Caracterización del agua previo y durante el ensayo. . . . .	48
34.	Estación de trabajo y descarga de datos. . . . .	48
35.	Procedimiento de filtrado. . . . .	49
36.	Productos resultantes del proceso de extracción. . . . .	49
37.	Madera secando después del lavado. . . . .	50
38.	Túnel de dilusion implementado en la sede JMC . . . . .	51
39.	Configuración MPI utilizado en la estufa residencial . . . . .	52
40.	Disposición termocuplas en estufa residencial prototipo . . . . .	53
41.	Niveles de apertura del aire primario . . . . .	55
42.	Masa de la leña antes y después del lavado. . . . .	57
43.	Humedad de la madera utilizada . . . . .	58
44.	Temperatura del agua ensayo extendido . . . . .	59
45.	Temperatura del agua ensayo por ciclos . . . . .	59
46.	Comportamiento pH Ensayo Extendido . . . . .	60
47.	Comportamiento pH Ensayo por Ciclos . . . . .	60
48.	Vista aumentada comportamiento pH ensayo extendido . . . . .	61
49.	Vista aumentada comportamiento pH ensayo por ciclos . . . . .	61
50.	Conductividad Eléctrica en Ensayo Extendido. . . . .	62
51.	Conductividad Eléctrica en Ensayo por Ciclos . . . . .	63



52.	Decaimiento de masa en ensayos con y sin leña lavada. . . . .	64
53.	Temperaturas registradas por termocuplas 1 y 2. . . . .	65
54.	Temperaturas registradas por termocuplas 3 y 4. . . . .	65
55.	Temperaturas registradas por termocuplas 5 y 6. . . . .	66
56.	Temperaturas registradas por termocuplas 7 y 8. . . . .	66
57.	Temperaturas registradas por termocupla 9. . . . .	67
58.	Temperaturas registradas por termocuplas 11 y 12. . . . .	67
59.	Temperaturas registradas por termocuplas 13 y 14. . . . .	68
60.	Concentraciones registradas de CO y CO <sub>2</sub> . . . . .	69
61.	Concentraciones registradas de C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> y SO <sub>2</sub> . . . . .	69
62.	Concentraciones registradas de NO <sub>x</sub> y NO. . . . .	70
63.	Factores de emisión máxicos de CO <sub>2</sub> y CO. . . . .	71
64.	Factor de emisión máxico para SO <sub>2</sub> , NO y NO <sub>x</sub> . . . . .	71



## Índice de cuadros

1.	Proyección del Consumo de Leña y desechos industriales en $m^3$ sólidos, por región y sector [Fuente: Elaboración propia en base a Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile (Centro de Micro Datos(2006)). . . . .]	20
2.	Consumo total de leña por región. [Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).] . . . . .	24
3.	Penetración de la leña según usos y región.[Fuente: CASEN (2017).] . . . . .	26
4.	Distribución de los artefactos utilizados por región para el año 2014.[Fuente: Elaboración propia en base a CDT (2015). . . . .]	26
5.	Características técnicas estufa Bosca Spirit 380. [Fuente: Ficha técnica Spirit 380.] . . . . .	28
6.	Límites de emisión según potencia [Fuente: Decreto 39 Min. del Medioambiente (2011).] . . . . .	29
7.	Propiedades de algunos medios porosos inertes [Fuente: Elaboración propia en base a Pickernacker et al.(1999)] . . . . .	29
8.	Niveles que originan estados de emergencia ambiental para $MP_{10}$ [Fuente: Decreto Supremo N° 59 (CONAMA)]. . . . .	32
9.	Niveles que originan estados de emergencia ambiental para $MP_{2,5}$ [Fuente: Decreto Supremo N° 12 (MMA)]. . . . .	32
10.	Índice de calidad del aire de Estados Unidos (US AQI) y su concentración equivalente en $MP_{2,5}$ [Fuente: World Air Quality Report 2020 (IQair)]. . . . .	35
11.	Tamaños de Biomasa informados por las publicaciones estudiadas. . . . .	38
12.	Descripción técnica de Testo 606-2 . . . . .	42
13.	Especificaciones técnicas pH y Conductividad Horiba PC-110 . . . . .	43
14.	Especificaciones técnicas de la Balanza Kyntel XY2000-2C . . . . .	44
15.	Ficha Técnica Balanza Kern IFB 300K-2 . . . . .	44
16.	Características MPI aplicado a la estufa rototipo . . . . .	52
17.	Tasa de quemado para leña lavada y no lavada. . . . .	64



# Introducción

La contaminación del aire afecta la salud de las personas y animales, daña la vegetación y el suelo, deteriora materiales, reduce la visibilidad y tiene el potencial para contribuir significativamente al cambio climático. Gran parte del territorio nacional se encuentra afectado actualmente por problemas de contaminación. Por ello, la calidad del aire sigue siendo una de las prioridades en materia de gestión ambiental [1].

En Chile, se reconocen tres grandes fuentes de contaminación del aire: los medios de transporte, las actividades industriales y la calefacción de las viviendas [2].

En relación a la energía consumida a nivel nacional para calefaccionar las viviendas, la leña es el principal combustible para calefacción en el centro-sur de Chile, siendo su combustión la principal fuente de contaminación atmosférica por emisión de material particulado ( $MP_{2,5}$ ) [3]. Durante la década pasada se han alcanzado niveles críticos de contaminación, siendo Chile poseedor de 4 de las 10 ciudades más contaminadas en Sudamérica durante 2020 [4]. Esto se da en un contexto en que se han aplicado políticas para mejorar la calidad del aire, sin embargo, producto de la masividad de consumo entre las regiones de Bio Bio y Aysen (sobre el 85 % de los hogares consumen leña para calefaccionar) hacen complejo un cambio de escenario.

Es por lo anterior, que se vuelve necesario pensar cómo disminuir las emisiones producidas por la leña. Para ello se pueden realizar varias acciones enfocadas a aumentar la eficiencia de combustión, entre las que se cuentan, el mejorar las condiciones en la cámara de quemado, y también, refinar el combustible. Este trabajo intenta esclarecer los reales aportes en la mitigación de emisiones contaminantes que puede tener el aplicar un protocolo de pretratamiento de lavado con agua a la leña, buscando así disminuir las impurezas que puedan causar o aumentar las emisiones de  $MP_{2,5}$ .



## Marco de Referencia

Dentro del marco del proyecto FONDEF-IDEA 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”, y en colaboración con las empresas BOSCA y Bosques del Norte, se realiza este trabajo que busca estudiar las consecuencias de aplicar un pretratamiento de lavado de leña en las emisiones contaminantes al momento de la combustión.

## Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo de título consiste en desarrollar experimentos de pretratamiento de lavado de leña en la especie *Eucalyptus Globulus* que permitan mitigar contaminantes atmosféricos.

## Objetivos Específicos

1. Identificar tres tipos de leña certificada más representativas de la zona centro-sur de Chile, para futuros procesos de lavado.
2. Desarrollar el proceso de lavado considerando cantidad de leños, humedad, volumen y tipo de agua, tiempo, ciclos y tipo de agitación, midiendo pH - Conductividad.
3. Evaluar la mitigación de contaminantes atmosféricos en base a pruebas de combustión con leña lavada en estufa de calefacción residencial prototipo.

## Parte I

# Marco Teórico

## 1. Madera

La madera es un material anisotrópico encontrado como principal contenido del tronco de un árbol. Los árboles se caracterizan por tener troncos que crecen cada año y que están compuestos por fibras de celulosa unidas con lignina. Las plantas que no producen madera son conocidas como herbáceas.

Como la madera la producen y utilizan las plantas con fines estructurales, es un material muy resistente, y gracias a esta característica y a su abundancia natural, es utilizada ampliamente por los humanos desde hace miles de años.

Pueden reconocerse y diferenciarse varias partes en la estructura física de la madera.

- **Corteza:** Es la capa más externa del árbol y se forma principalmente por células muertas del árbol. Ésta capa es la protección contra los agentes atmosféricos [5].
- **Cambium:** Es la capa que sigue a la corteza y se divide en dos capas denominadas: Capa inferior o capa xilema que forma la madera, y una capa exterior o capa floema que se coloca formando la corteza [5].
- **Albura:** Es la madera de más reciente formación (anillos más externos antes de la corteza), tiende a ser más blanda y de un color más blanquecino debido a que por dichas hebras viaja más savia [5].
- **Duramen:** Corresponde a los anillos más interiores de la madera. Es más dura y consistente debido a que está compuesta por células por las que ya no circula savia, y a causa de esto, adquieren un color más oscuro [5].

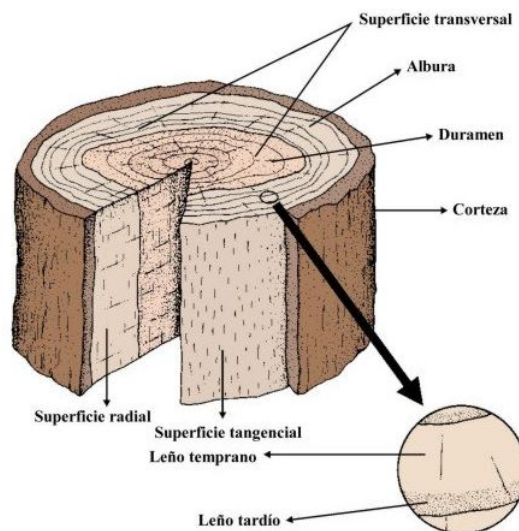


Figura 1: Partes de la madera.

Por otro lado, según su dureza, la madera puede clasificarse en dos grandes grupos:

- **Maderas Duras:** Son aquellas que proceden de árboles de un crecimiento lento, por lo que son más densas y soportan mejor las inclemencias del tiempo que las blandas. Estas maderas proceden, por lo general, de árboles de hoja caduca, pero también pueden ser de hoja perenne, que tardan décadas, e incluso siglos, en alcanzar el grado de madurez suficiente para ser cortadas. Son mucho más caras que las blandas, debido a que su lento crecimiento provoca su escasez, pero son mucho más atractivas [5].
- **Maderas Blandas:** Engloba a la madera de los árboles pertenecientes a la orden de las coníferas. La gran ventaja que tienen respecto a las maderas duras, es su ligereza y su precio mucho menor. No tiene una vida tan larga como las duras. La manipulación de las maderas blandas es mucho más sencilla, aunque tiene la desventaja de producir mayor cantidad de astillas [5].

Una vez cortada y seca, la madera se utiliza para diferentes aplicaciones, entre las que se cuentan la fabricación de papel, construcción, arte, carpintería, calefacción y muchos más. La madera que se utiliza para alimentar el fuego se denomina leña y es una de las formas más simples de biomasa.

## 1.1. Composición Química

En su interior la madera se compone elementalmente, en promedio, de Carbono (C) un 50 %, Oxígeno (O) 42 %, Hidrógeno (H) 6 % y un 2 % restante de Nitrógeno (N), Azufre (S), Calcio (Ca), Sodio (Na), Magnesio (Mg), entre otros metales presentes en forma de iones [5] [6].

Estos elementos se entrelazan y forman moléculas de variadas geometrías y tamaños que dan origen a los compuestos orgánicos principales. Estos componentes orgánicos no son entidades químicas que pueden identificarse fácilmente, cada uno incluye varios compuestos químicamente relacionados. La separación y determinación cuantitativa de cada componente se realiza en un laboratorio utilizando solventes y técnicas específicas que se explicarán más adelante.

La madera se compone principalmente de tres compuestos macro llamados *Celulosa*, *Hemicelulosa*, *Lignina* y un cuarto denominado *Extraíbles* que representa aproximadamente entre un 3 - 10 % de la masa de la leña [7]. Cada uno de ellos, presentes en mayor o menor cantidad forman la pared celular de madera y le aporta las características físicas y químicas que la hacen tan particular. La *Ceniza* también representa un pequeño porcentaje de la masa total y también es considerada como la composición inorgánica de la madera.

- **Celulosa:** Se forma por la unión de moléculas de glucosa mediante enlaces glucosídicos. Es una larga cadena polimérica de peso molecular variable y de fórmula empírica  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Posee una estructura lineal fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas de glucosa, lo que las vuelve insoluble en agua [5].

La celulosa en la madera es parcialmente cristalina, el resto es amorfo. Esto depende de la materia prima de la que provenga. La presencia de Hemicelulosa en la celulosa parece producir disturbios en su forma cristalina. Mientras más cristalina sea la celulosa, mayor densidad tendrá la madera [7].

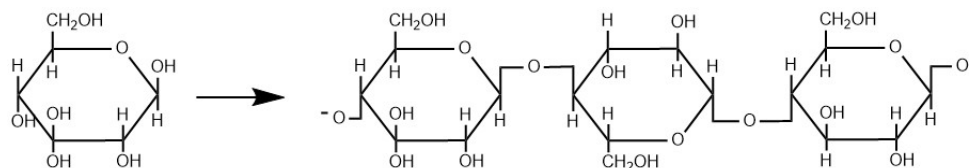


Figura 2: Estructura de la Celulosa [Fuente: Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de Melina, de una plantación proveniente del departamento de Izabal (U. San Carlos de Guatemala)].



Figura 3: Porcentaje de Celulosa en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)].

- Hemicelulosa:** Es un heteropolisacárido (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero) formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos que a su vez son generados por dos tipos de monosacáridos unidos que forman una cadena lineal ramificada. Entre los monosacáridos que más destacan se encuentran la glucosa, la galactosa o la fructosa.

Las hemicelulosas son polisacáridos asociados a menudo con la celulosa, pero la celulosa y la hemicelulosa tienen composiciones y estructuras distintas. Diversos azúcares comprenden hemicelulosa, mientras que la celulosa se deriva exclusivamente de la glucosa. [8].

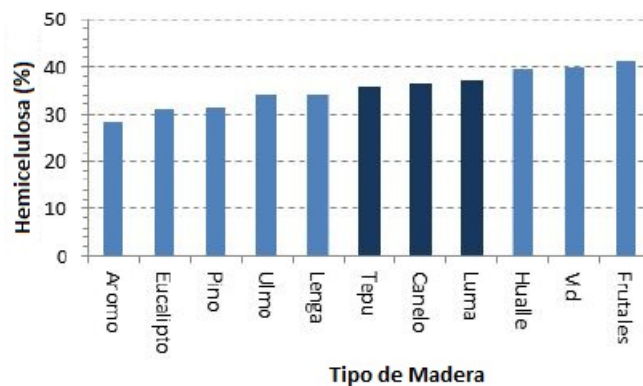


Figura 4: Porcentaje de Hemicelulosa en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residencial wood combustion (U. Católica de Temuco)].

- Lignina:** Es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogenicidad. El término "lignina" no se refiere a un solo compuesto, bien definido, sino que es un término colectivo para una serie de compuestos estrechamente relacionados. Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto varios modelos para representar su estructura. Como molécula posee un elevado peso molecular producto de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos.

La lignina se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato, pero estrechamente relacionada con los compuestos de este grupo) que cumple múltiples funciones entre las que se cuentan el conferir resistencia química y biológica a la pared celular y resistencia mecánica al tallo.

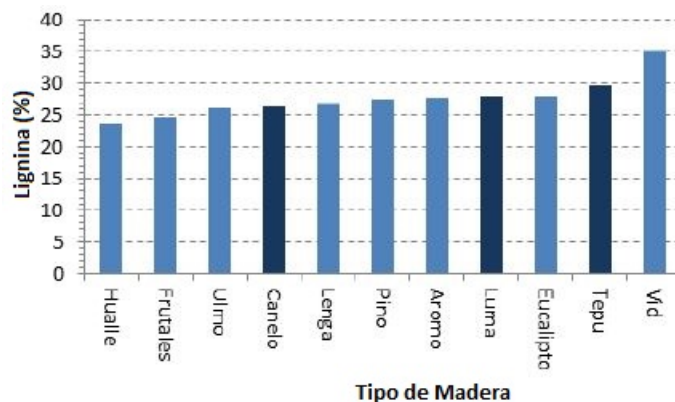


Figura 5: Porcentaje de Lignina en maderas de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residential wood combustion (U. Católica de Temuco)].

- **Extraíbles:** Por sustancias extraíbles de la madera se entienden aquellas sustancias que se extraen de diferentes partes de los árboles mediante agua, disolventes orgánicos, vapor de agua y mediante un exprimido mecánico. Entre los extraíbles se encuentran diversos compuestos orgánicos e inorgánicos [5].

Entre los compuestos orgánicos que se encuentran en los extractos de madera se encuentran los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ceras, glicéridos y compuestos nitrogenados, ácidos grasos, ácidos resínicos y esteroides [7].

- **Cenizas:** Pequeñas cantidades de elementos minerales como calcio (K), potasio (K) y magnesio (Mg), se encuentran presente en la ceniza de madera. Normalmente, el volumen de la ceniza raramente es menor a 0,2% y mayor que 1% del porcentaje en peso de la madera.

La ceniza también puede contener cantidades pequeñas de otros elementos como fósforo (P), azufre (S), sodio (Na), aluminio (Al), titanio (Ti), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), plata (Ag), bario (Ba), plomo (Pb), y otro (Au) [5].

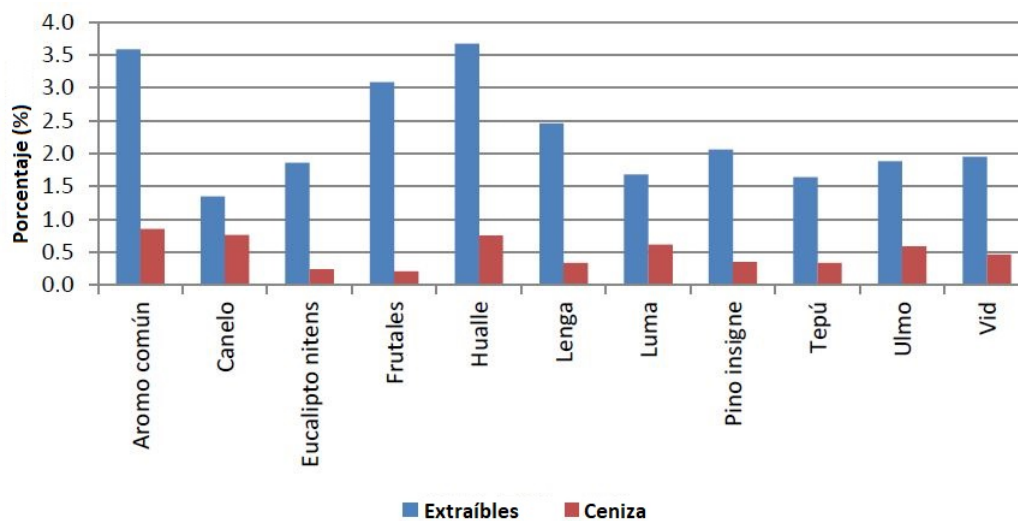


Figura 6: Porcentaje de Extraíble (azul) y Ceniza (rojo) presente en árboles de Chile [Fuente: Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residential wood combustion (U. Católica de Temuco)].

### 1.1.1. Poder Calorífico y Humedad Interna

En combustión de madera, la energía emitida puede ser cuantificada a través del poder calorífico. Este término se define como la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente. Este valor puede cambiar dependiendo de la composición química de la muestra, pero en general, para la madera se encuentra en el rango de 15 - 23 [MJ/kg] y 18 - 29 [MJ/kg] para maderas duras y blandas respectivamente. [9] [6].

La mayor parte de los combustibles contienen hidrógeno, que forma agua durante la combustión. El poder calorífico de un combustible será diferente dependiendo de si el agua en los productos de la combustión se halla en forma líquida o de vapor. El poder calorífico se denomina poder calorífico inferior o LHV (lower heating value) cuando el agua sale como vapor, y poder calorífico superior o HHV (higher heating value) cuando el agua en los gases de combustión se condensa por completo, de manera que también se recupera el calor de vaporización. La diferencia entre estos dos poderes caloríficos es igual al producto de la cantidad de agua y la entalpía de vaporización del agua a temperatura ambiente [10].

Debido a las funciones vitales que tiene para el árbol, la madera tiende a ser un material que retiene agua, ya que en sus fibras se transportan los nutrientes que llegan a todas las ramas, hojas y frutas o flores del árbol. A causa de ésta característica, el contenido de humedad es un factor importante cuando hablamos de poder calorífico, pues a mayor contenido de humedad más calor o energía calorífica se disipa en aumentar la temperatura del agua y evaporarla, es decir, hay menos calor útil al combustionar, lo que se traduce como un poder calorífico del combustible menor, y en consecuencia, una menor eficiencia de combustión y un aumento en emisiones contaminantes.

La figura 7, muestra cómo disminuye el poder calorífico en distintas especies cuando el porcentaje de humedad al interior de la madera es mayor.

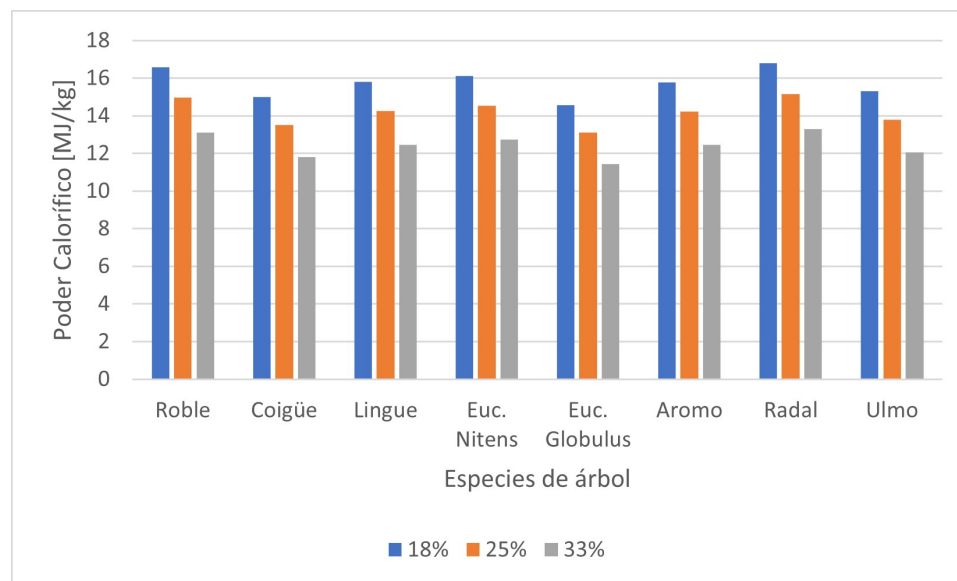


Figura 7: Poder calorífico para distintas especies con distintos contenidos de humedad [Fuente: Elaboración propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)].



## 1.2. Consumo de leña en Chile

En Chile, debido a sus características, la madera es una importante fuente renovable de recursos socioeconómicos e industriales. Según datos de 2019 [11], el recurso forestal (bosque nativo y plantaciones forestales) cubría 17,9 millones de hectáreas, lo que representa un 23,7% de la superficie nacional (75,6 millones de hectáreas). Más del 90% del recurso forestal (16,2 millones de ha) se localiza entre la Región del maule y la Región de Magallanes, correspondiendo a uso bosque nativo el 81,3% de la superficie (13,2 millones de ha), y uso plantaciones forestales el 17,6% (2,86% millones de ha); la diferencia corresponde a uso bosque mixto con 1,1%.

La leña es la madera utilizada para hacer fuego en estufas, chimeneas o cocinas. Es una de las formas más simple de biomasa usada mayormente para calefaccionar y cocinar. Ha sido componente esencial de la matriz energética chilena. Sin embargo, a pesar de su importancia, no se han realizado estudios sistemáticos sobre esta materia.

A nivel país, se consumen entre 14 y 21 millones [ $m^3st$ ] de leña [12]. El sector residencial representa la mayor parte del mercado con 98.47%, por su parte, el sector turístico/hotelero e industrial consumen el 1.53% restante. Debido a esto el estudio se enfocará principalmente en analizar las características de consumo en el sector residencial, pues es el que mayor influencia posee.

### 1.2.1. Evolución del consumo.

En Chile no existe un sistema de registro permanente y actualizado sobre el consumo de combustibles derivados de la madera, como ocurre con otras fuentes de energía. Las estadísticas oficiales, publicadas por la Comisión Nacional de Energía (CNE), se basan principalmente en proyecciones realizadas a partir de un modelo elaborado a comienzos de los '90 por el Instituto Forestal (INFOR) y una medición del consumo nacional de leña encargado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) el año 2015.

A causa de lo señalado, las estadísticas existentes sobre el consumo de combustibles derivados de la madera en Chile tienen un alto componente de imprecisión, el cual está asociado a las deficiencias de la información utilizada en la elaboración y corrección de los modelos de proyección.

Teniendo estas consideraciones previas, es posible realizar un estudio a lo largo de los años de la evolución del consumo a nivel nacional. Este insumo será importante para definir los tipos de leña más consumidas a nivel nacional.

Durante el año 2006, se dió a conocer un estudio realizado por el Centro de Micro Datos [13], el cual tuvo por objetivo recopilar, sistematizar y analizar los trabajos desarrollados sobre el consumo de leña y temas asociados en Chile desde el año 1990 a 2005. En base a este trabajo se generó una proyección del consumo nacional de leña según sector económico, región y tipo de leña utilizada.

Cuadro 1: Proyección del Consumo de Leña y desechos industriales en  $m^3$  sólidos, por región y sector [Fuente: Elaboración propia en base a Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile (Centro de Micro Datos(2006)].

Región	Proyección Consumo Residencial	Desv. Est. Consumo Residencial	Proyección Consumo Comercial e Institucional	Desv. Est. Consumo Comercial e Institucional	Proyección Consumo Industrial	Desv. Est. Consumo Industrial	Proyección Consumo Total de leña	Desv. Est. Consumo Total	Estimación consumo de desechos industriales	Proyección Consumo Total de Combustibles de Madera
I										
II										
III										
IV	158.760	3.910			271.884	2.799	430.644	4.809	—	—
V	69.131	2.693	10.881	423,9	289.139	19.410	369.150	19.601	—	—
VI	468.883	11.420	1.680,8	40,9	192.838	7.787	663.402	13.822	—	—
VII	1.737.238	27.270	11.279,5	177,1	1.078.895	3.509	2.827.413	27.495	—	—
VIII	2.341.014	58.183	66.328,7	1.648,5	1.479.555	9.091	3.886.898	58.912	—	—
IX	1.485.064	43.344	67.275,8	1.963,6	654.519	5.024	2.206.859	43.679	—	—
X	3.302.928	40.645	373.405,7	4.595,1	135.528	812	3.811.862	40.912	—	—
XI	459.280	10.105	83.630,1	1.840	3.107	36	546.017	10.271	—	—
XII	281.477	14.243					281.477	14.243	—	—
RM	90.133	1.694	12.204,6	229,4	25.306	63.724	127.644	63.747	—	—
Nacional	10.393.908	90.114	626.686	10.918	3.585.888	68.021	14.879.482	113.431	5.076.000	19.955.482

En base a los mostrado en el cuadro 1, se puede inferir que el consumo de leña es mucho mayor a nivel nacional en el sector residencial que en el industrial, comercial e institucional y dicho consumo se concentra entre las regiones VII a X en las zonas rurales por sobre las urbanas. Esto se debe principalmente a las bajas temperaturas invernales en el centro y sur del país y a la abundancia de biomasa forestal, entre otras.

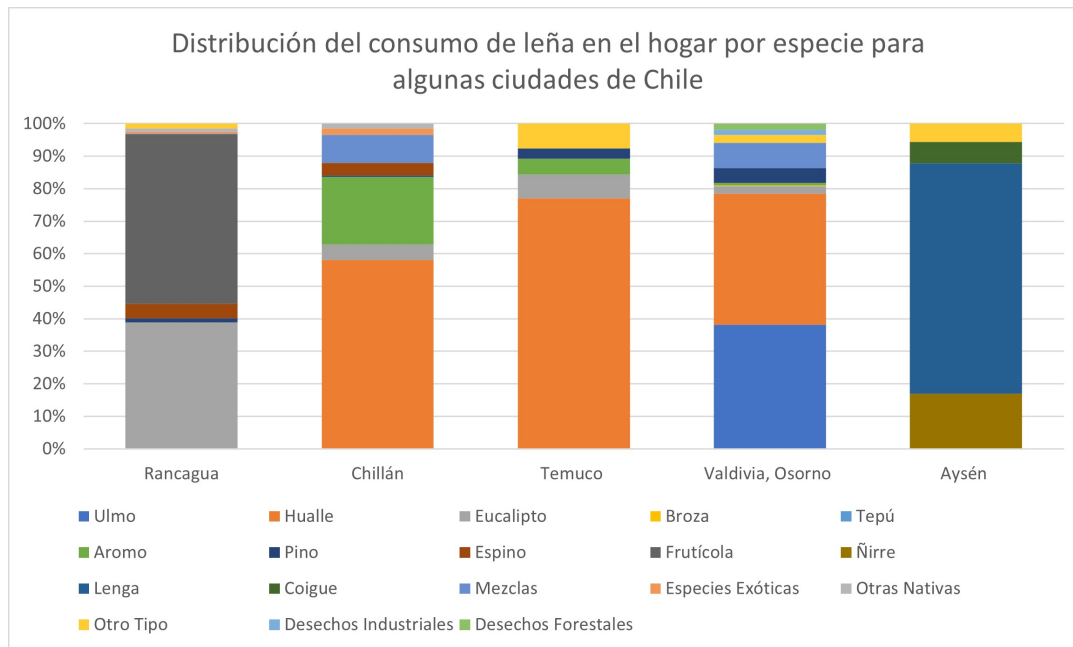


Figura 8: Especies consumidas en algunas ciudades de Chile [Fuente: Elaboración propia en base a Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile (Centro de Micro Datos(2006)].

En base a la información provista por este informe (Figura 8) es claro que el consumo en algunas de las principales ciudades de la zona centro y sur del país se concentraba, en esos años, principalmente en especies nativas. Según lo señalado, en Rancagua las especies más consumidas corresponden a Eucalipto y árboles frutícolas; el Roble Hualle tiene preponderancia en Chillán (junto al Aromo), Temuco, Valdivia y Osorno donde también se utiliza mucho el Tepú. Por su parte, en la zona de Aysén el predominio es de la

Lenga y el Ñirre.

El estudio señala también, que el principal uso de la leña en el sector residencial es la calefacción, con proporciones que varían desde el 51,4 % al 99,4 % aumentando el porcentaje de hogares que utilizan leña mientras más austral es la zona. El segundo uso más común de la leña es para cocinar, prácticamente la totalidad de la leña consumida en Chile se combustiona. Además de representar el 17,5 % de la matriz energética del país (el tercero de mayor importancia tras el petróleo y gas natural) [13].

Otro estudio entregado durante el año 2012 y desarrollado por la Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo (AIFBN) presentó un informe que analiza la evolución del consumo de combustibles derivados de la madera entre los años 1992 y 2003. Para esto utiliza como base la información entregada por Diagnóstico del Mercado de la Leña en Chile [13] y la CNE en base a la metodología desarrollada por INFOR (1994). De el se desprende, que en este período de tiempo se produjo un aumento notorio en el consumo del sector industrial, principalmente en las regiones VII y VIII (Figura 9 y 10).

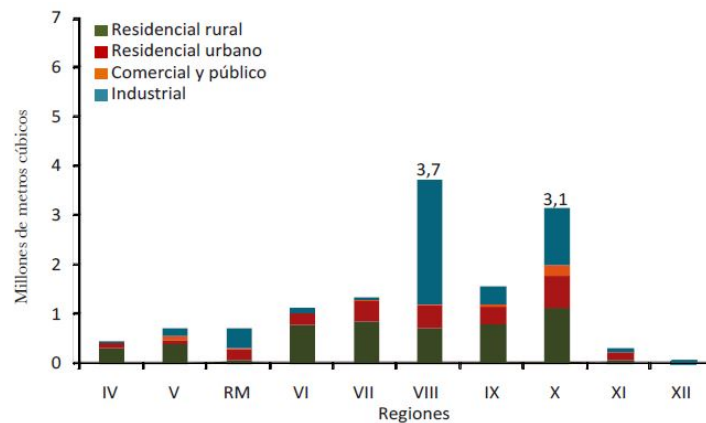


Figura 9: Consumo regional de combustibles derivados de la madera por sector en 1992 [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))].

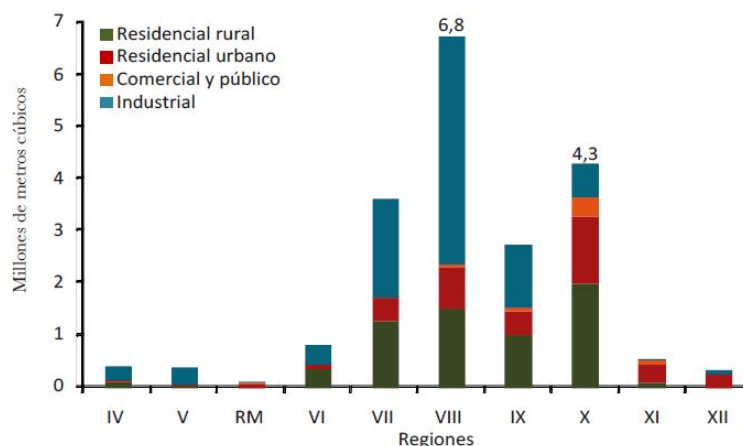


Figura 10: Consumo regional de combustibles derivados de la madera por sector en 2003 [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))].

En la figura 11 puede verse como a lo largo de los años aumentó de manera constante el consumo de combustibles derivados de la madera desde el año 1980 a 2010, llegando casi a triplicarse el valor inicial.

Por otro lado, se informa que al año 2010 el consumo de combustibles derivados de la madera correspondía en un 10% a conversión a electricidad, un 29% al sector industrial/minero y el 61% restante al sector residencial, comercial y público [14].

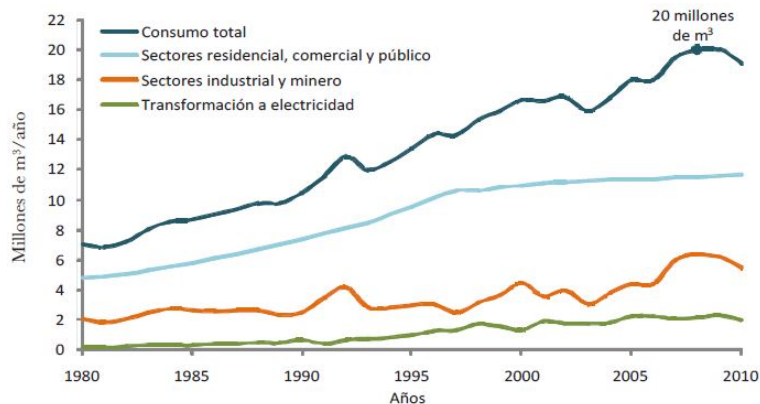


Figura 11: Evolución del consumo de combustibles derivados de la madera en Chile [Fuente: Leña, energía renovable (AIFBN (2012))].

En términos de resultados, el sector residencial es responsable del 98,47% del consumo anual de leña de todos los sectores levantados en este estudio, siguiendo en importancia el sector PYME no generación con un 0,65%, el sector establecimientos de uso publico con un 0,60%, el sector Hoteles y restaurantes con un 0,25% y finalmente, el sector comercial con un 0,03%. Por su parte, en el sector residencial, la leña está presente en un 33,2% del total de viviendas. Dicha penetración va en aumento hacia el sur, hasta llegar a la XI región, donde casi la totalidad de las viviendas declaran consumir leña [15].

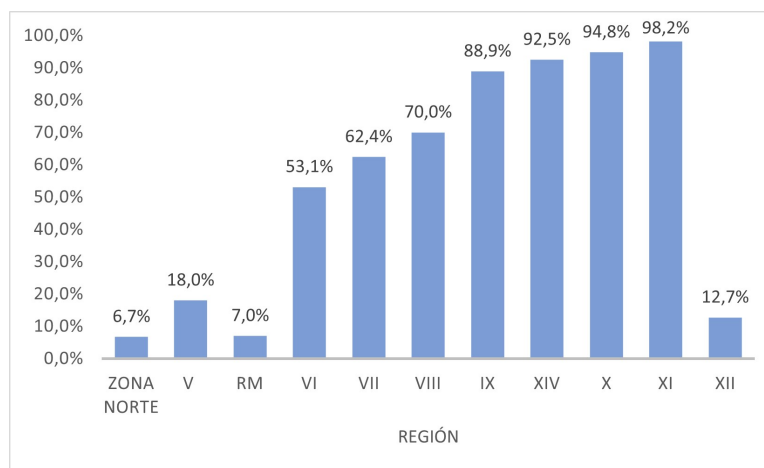


Figura 12: Penetración de leña con respecto al total de viviendas tipología en el sector residencial. [Fuente: Elaboración propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)].

Ahora bien, si el enfoque es en las especies de leña utilizadas en dichos hogares, se puede verificar que de los 11.770.673  $[m^3 \text{ st/año}]$  de consumo estimado anual, los de mayor influencia en el mercado son el Eucalipto (*Eucalyptus Globulus*) y el Roble Hualle (*Nothofagus Obliqua*) con un 23,7% y 23,4% respectivamente. Le siguen la madera Nativa (12%), el Aromo (8%), el Pino (7%), entre otras (Figura 13).

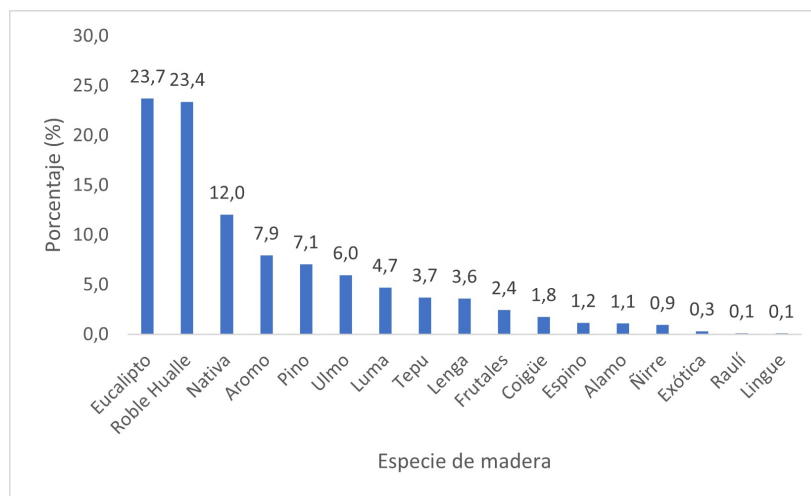


Figura 13: Distribución del consumo por especie en el sector residencial. [Fuente: Elaboración propia en base a Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera (2015)].

Durante el año 2020 se entrega el informe “*Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética*” [12], el cual realiza un análisis recopilatorio de varias fuentes para el mercado de la leña a nivel normativo, logístico (cadena de actores) y económico. A nivel nacional, reconoce obstáculos en la normativa para responder adecuadamente a la complejidad del mercado de la leña. Primero producto de la hiperfragmentación de la legislación en torno a la leña, la falta de fiscalización y alta informalidad. Por otro lado, la falta de reconocimiento legal de la leña como un combustible sólido y finalmente, la existencia de institucionalidad atomizada y una gobernanza difusa, complejizan aún más el poder establecer una política pública adecuada.

Como experiencia comparada, se considera el ejemplo noruego para la explotación sostenible de los recursos naturales. País donde se desarrollaron mecanismos de transparencia e información pública sobre el manejo de las rentas extractivas, lo que promovió el control social y democrático de su uso, tanto en el sector público como privado. Por su parte, al reconocer la leña como biocombustible, especificando su tratamiento diferenciado respecto a los otros tipos de combustibles permitiría que la Superintendencia de Electricidad y Combustibles fiscalice el mercado de la leña en sus fases más importantes (producción, almacenamiento, transporte y distribución)

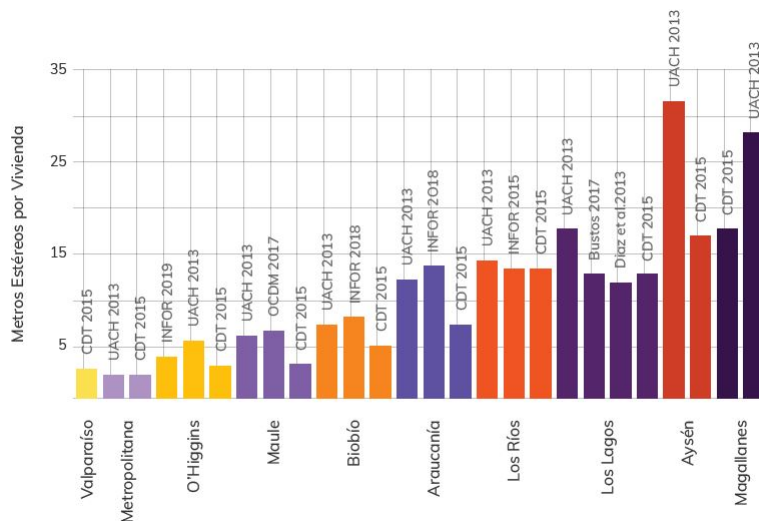


Figura 14: Promedio de consumo de leña por vivienda, según distintas fuentes. [Fuente: Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).]

La Figura 14 muestra que hay pocos estudios generales a nivel nacional y la mayoría son locales enfocados al mercado de leña, esto trae como consecuencia alta variabilidad en la proyección de datos por región. Es por ello que se recomienda trabajar con intervalos de consumo, establecimiento límite inferior y superior. De este modo, podemos saber que el consumo total de leña desde la RM hasta Magallanes es entre 14 y 21 millones de  $m^3 st$  de leña (Cuadro 2).

Cuadro 2: Consumo total de leña por región. [Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).]

Región	Número de viviendas	Consumo Inferior [ $m^3 st$ ]	Consumo Superior [ $m^3 st$ ]
RM	2.378.490	281.940	326.446
O'Higgins	354.324	591.112	683.149
Maule	411.211	879.875	1.806.887
Biobío	768.162	2.813.436	4.495.239
Araucanía	381.170	2.517.281	4.714.219
Los Ríos	153.990	1.945.422	1.961.807
Los Lagos	332.935	4.235.207	5.647.570
Aysén	44.726	741.196	1.364.923
Magallanes	65.641	19.071	29.964
<b>Total</b>	<b>4.890.649</b>	<b>14.024.541</b>	<b>21.030.204</b>

También es importante destacar el hecho de que el consumo de leña a nivel país se concentra principalmente entre las regiones del Biobío y Los Lagos. Dentro de las señaladas en el recuadro, es llamativo lo que ocurre en regiones como la Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, ya que tanto el consumo inferior como el superior son más 10 veces la cantidad de viviendas consideradas, es decir, consumen alrededor de 3 veces más leña por vivienda que las demás regiones del país. Esto en parte explica los frecuentes hechos de contaminación atmosférica ocurridos cada año en zonas como Temuco, Osorno, Valdivia o Puerto Montt.

Con la información proporcionada en este trabajo, es posible generar las Figuras 15 y 16, que ayudan a visualizar algunas de las especies de leña más consumida en cada región del país, diferenciadas según si estas corresponden a especies nativas o exóticas.

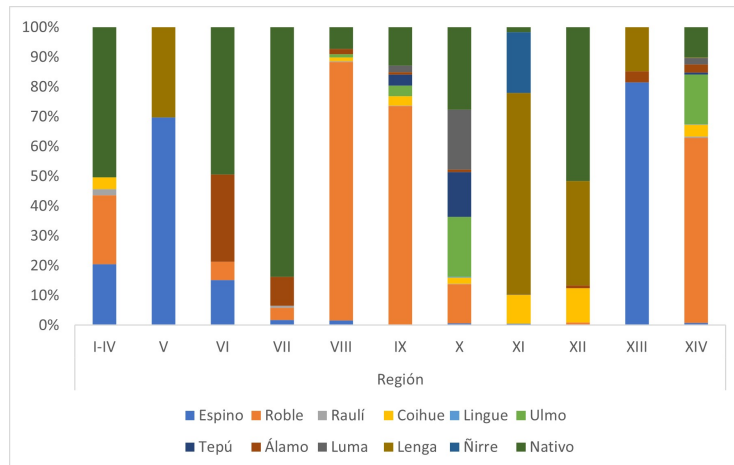


Figura 15: Especies nativas más consumidas como leña por región en Chile. [Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).]

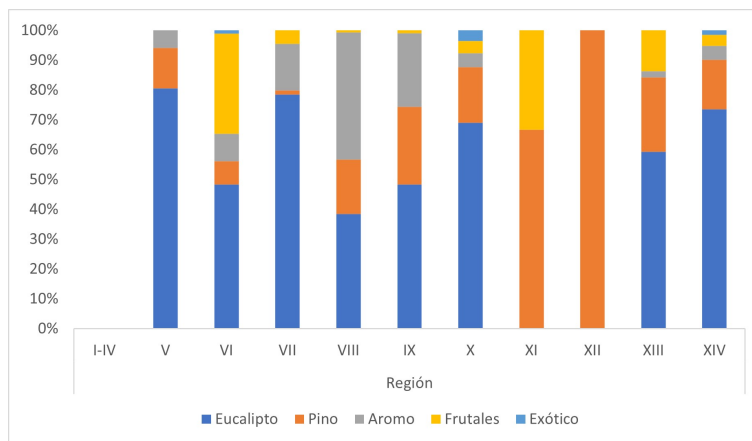


Figura 16: Especies exóticas más consumidas como leña por región en Chile. [Fuente: Elaboración propia en base a Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (2020).]

Para la Figura 15 el término *Nativo*, se refiere a encuestados que señalaron que consumían leña de este origen pero no podrían especificar la(s) especie(s) correspondientes. Lo mismo ocurre en la Figura 16 con el término *Exótico*.

En relación a las especies nativas, es claro que el hecho de que provengan de bosques con especies mixtas hace complejo diferenciar adecuadamente las cantidades de cada especie consumidas, por lo mismo también, la clasificación *Nativo* tiene altos porcentajes en la mayoría de las regiones mostradas. Por otro lado, con respecto a las especies exóticas y su origen en plantaciones forestales hace más fácil su caracterización en los estudios respectivos.

Finalmente, a modo de resumen de las diversas fuentes presentadas y en relación a la evolución

del consumo de leña en el país durante los últimos 15-20 años, se observan algunas discrepancias en los estudio y se enfocan principalmente en las estimaciones y consideraciones de cada uno. Sin embargo, es notorio que el consumo de leña ha aumentado de 8 a aproximadamente 20 millones de  $m^3st$  desde 1980 a la actualidad, sin embargo, durante los últimos 15 años se ha mantenido en el rango 14-20 millones de  $m^3st$ . Por otro lado, según lo presentadolas principales especies consumidas en forma de leña son practicamente las mismas en todos los estudios. Es así como a nivel país, el **Roble Hualle** (*Nothofagus obliqua*) y **Eucalipto** (*Eucalyptus globulus*) son señalados constantemente como las especies de madera más utilizadas.

## 2. Tecnologías de combustión de Leña

Según la información entregada por la encuesta CASEN en el año 2017 los principales usos de la leña en Chile son la calefacción, cocina y agua caliente sanitaria respectivamente (Cuadro 3). Del mismo modo, su penetración se concentra principalmente en las regiones ubicadas desde el centro al sur del país, destacando la Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén como zonas donde el consumo de leña es muy elevado.

Cuadro 3: Penetración de la leña según usos y región.[Fuente: CASEN (2017).]

Región	Calefacción	Cocina	Agua Caliente Sanitaria
O'Higgins	46,93 %	2,28 %	1,09 %
Maule	61,43 %	4,92 %	2,13 %
Bio bío	67,19 %	7,31 %	1,78 %
Araucanía	87,07 %	34,47 %	17,77 %
Los Ríos	90,28 %	36,52 %	13,62 %
Los Lagos	88,81 %	36,05 %	14,18 %
Aysén	87,40 %	30,63 %	14,39 %

Otro aspecto importante para caracterizar el mercado de la leña son los artefactos enfocados a cumplir con los diversos usos señalados. En ese sentido, las estufas de cámara doble para calefacción son la tecnología más utilizada a nivel nacional (51,5 %), seguidas por las cocinas a leña (16,6 %) y salamandras (13,6 %) en su mayoría, el porcentaje restante se divide entre equipos de cámara simple, chimeneas, calderas a leña y equipos hechizos o de construcción casera (Cuadro 4).

Cuadro 4: Distribución de los artefactos utilizados por región para el año 2014.[Fuente: Elaboración propia en base a CDT (2015).]

Región	Cámara Doble	Cocina a Leña	Salamandra	Cámara Simple	Equipo Hechizo	Chimenea	Caldera a Leña	Total [N° Equipos]
O'Higgins	37,0%	11,3%	26,7%	11,1%	9,9%	4,1%	0,0%	165.372
Maule	56,6%	12,0%	12,6%	8,7%	7,1%	3,1%	0,0%	234.279
Bio bío	51,3%	14,7%	16,6%	8,2%	6,3%	2,9%	0,0%	459.243
Araucanía	57,6%	18,4%	10,8%	6,4%	5,2%	1,7%	0,0%	292.255
Los Ríos	49,4%	28,6%	3,0%	16,9%	1,2%	0,5%	0,4%	254.569
Los Lagos	44,4%	35,9%	4,3%	10,0%	3,4%	1,2%	0,8%	133.164
Aysén	35,8%	38,3%	1,3%	23,7%	0,0%	0,6%	0,3%	38.505
Nacional	51,5%	16,6%	13,6%	10,6%	5,5%	2,2%	0,1%	1.873.803

En base al cuadro 4 pueden realizarse algunas observaciones enfocadas al uso de los artefactos de leña. En relación a los equipos de cámara doble, estos se utilizan proporcionalmente más entre las regiones de O'Higgins y la Araucanía, además el uso de cocina a leña y salamandra es bastante similar entre ambas tecnologías en dichas regiones. Por otro lado, desde Los Ríos al sur, el uso de estufas de cámara doble y cocinas a leña es, porcentualmente, bastante mayor a la influencia de las salamandras o las estufas de cámara simple. En lo referido a los equipos hechizos o chimeneas es claro que su uso se concentra principalmente entre

las regiones de O'Higgins y Araucanía. El factor climático es uno de los que mejor explica estas diferencias tan claras entre ambas zonas del país, ya que desde Los Ríos al sur la lluvia y el frío son mucho más frecuentes, y debido a la cantidad de horas que se mantiene encendida la estufa en esas zonas, un gran número de personas utilizan dicha energía para cocinar y calefaccionar el hogar al mismo tiempo.

## 2.1. Estufa BOSCA Spirit 380

Como se ha mostrado en las secciones anteriores, las estufas de combustión de doble cámara son el artefacto más utilizado a nivel residencial en el país. Es por ello que durante el desarrollo de este trabajo de titulación se utilizará durante los ensayos de combustión una estufa con éstas características. En particular, el modelo a ocupar es una estufa de la marca Bosca y modelo Spirit 380.

La estufa Spirit 380, posee en su interior un hogar de combustión en el cual se generan dos zonas de combustión, la principal en la base del hogar donde se encuentra la leña, y la segunda, es sobre los troncos y al interior de la pieza denominada "templador".



Figura 17: Estufa Spirit 380.

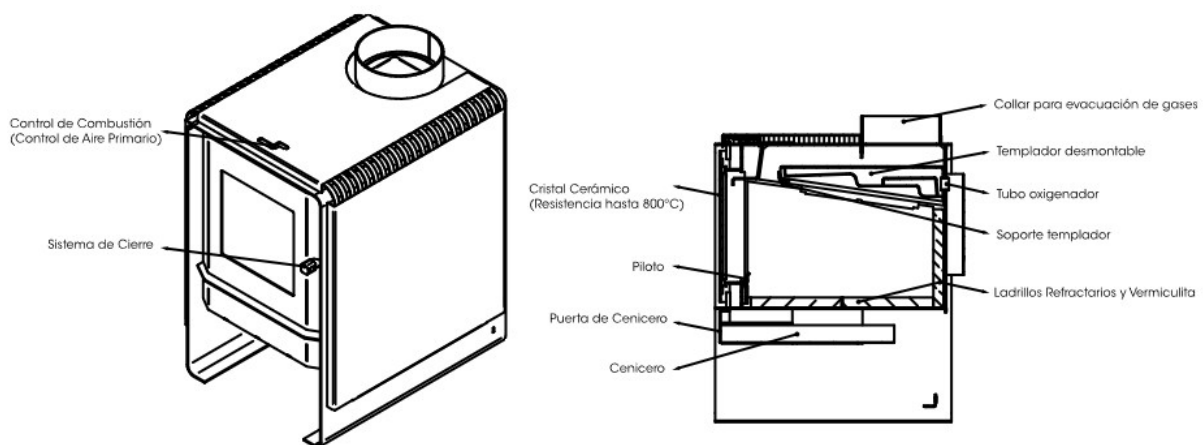


Figura 18: Imagen referencial Bosca Spirit 380. [Fuente: Manual de uso Spirit 380.]

En este modelo, la primera zona de combustión se genera en la parte inferior de la cámara. Para ello la estufa cuenta con dos entradas de aire que son reguladas mediante un mecanismo que permite mayor o menor flujo de aire en las entradas (tiraje superior). Este aire primario ingresa a temperatura ambiente y al ser más denso que el existente al interior de la cámara de combustión, por convección, este desciende

por la ventanilla de la puerta gracias a deflectores instalados en la parte frontal de la estufa. Luego, dicho flujo de aire pasa por la zona de combustión, donde aumenta su temperatura y disminuye su densidad. Posteriormente, sube a la parte superior del hogar de combustión e ingresa al templador donde comienza la segunda etapa de quemado.



Figura 19: Esquema del sistema de doble combustión Spirit 380. [Fuente: Manual de uso Spirit 380.]

Por la parte trasera de la estufa se encuentra la entrada de aire secundario, el cual es dirigido al templador (pieza desmontable encargada de combustionar el material volátil desprendido de la primera combustión), esta parte de la estufa funciona como una zona de post combustión que ayuda a transparentar los gases producto emitidos, y por lo tanto, disminuye las emisiones de material particulado y aumenta la eficiencia del proceso.

Además de las entradas de aire indicadas previamente, la estufa también posee una puerta para extraer el recipiente donde se deposita la ceniza generada por el proceso de combustión de leña. Esta zona es otro ingreso de aire a la cámara de combustión, ya que al ser abierta la puerta del cenicero permite la interacción del aire exterior con la cámara de combustión. Dicho aire ingresa directamente por la parte inferior del hogar de combustión y en consecuencia, cambia la proporción de aire-combustible presente en la cámara de quemado.

Cuadro 5: Características técnicas estufa Bosca Spirit 380. [Fuente: Ficha técnica Spirit 380.]

<b>Potencia</b>	10,8 [kW] / 9888 [kcal/h]
<b>Eficiencia</b>	68 %
<b>Superficie de Calefacción</b>	Hasta 180 m <sup>2</sup>
<b>Tamaño (alto x ancho x profundidad)</b>	84,2 [cm] x 54,6 [cm] x 56,5 [cm]
<b>Peso</b>	87,2 kg
<b>Diámetro de cañón</b>	6"

## 2.2. Normativas de emisiones para estufas de combustión de leña en Chile.

Desde el año 2011, comienza a regir el Decreto N° 39 *Norma de emisión de material particulado para artefactos que combustionen o puedan combustionar leña y derivados de la madera* [16], entrando en vigencia el año 2013. Este decreto aplica a todo tipo de artefacto nuevo que opera con leña y que tenga una

potencia menor o igual a 25 [kW], estableciendo límites máximos de emisión de material particulado.

Cuadro 6: Límites de emisión según potencia [Fuente: Decreto 39 Min. del Medioambiente (2011).]

Potencia Térmica Nominal [kW]	Emisión de Material Particulado [g/h]
$\leq 8$	2,5
$8 < P \leq 14$	3,5
$14 < P \leq 25$	4,5

Para la fiscalización de ésta normativa, se le otorgaron atribuciones a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). La normativa asociada a la certificación de estufas de combustión de leña tienen relación con las normas CH-5 y CH-28 respectivamente. Cabe señalar que ambos métodos corresponden a la traducción de normativa emitida por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos.

### 2.3. Medio Poroso Inerte

Este tipo particular de material ha comenzado a ser utilizado en procesos de combustión de combustibles gaseosos y líquidos, gracias a su capacidad de potenciar los tres métodos de transferencia de calor conocidos (convección, conducción y radiación). Es construido en base a cerámicas, y por lo mismo, posee entre sus características el soportar altas temperaturas de operación, una alta resistencia a la erosión y al desgaste. Sin embargo, también es un material frágil con baja elasticidad.

Otro aspecto importante al hablar de los MPI es justamente la porosidad asociada y el tamaño o densidad de ellos. Este factor influye en el proceso de combustión al interior de la cerámica y por lo mismo, en la transferencia de calor. A modo de ejemplo, un material con tamaño de poro pequeño posee una mayor conductividad térmica y convección debido a su mayor superficie sólida de contacto, pero una radiación mucho menor; por el contrario, con un tamaño de poro mayor aumenta la transmisión de calor por radiación y disminuye la conducción y convección.

Cuadro 7: Propiedades de algunos medios porosos inertes [Fuente: Elaboración propia en base a Pickernacker et al.(1999)]

Propiedades	$Al_2O_3$	$SiC$	$ZrO_2$
Temperatura máxima de aire utilizado [°C]	1900	1600	2300
Conductividad térmica a 1000 °C [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]	5-6	20-50	2-4
Emisividad total a 2000 K	0,28	0,9	0,31
Coefficiente de expansión lineal térmica desde 20 - 1000 °C [ $10^{-6}K^{-1}$ ]	8	4-5	10-13
Resistencia al shock térmico [ $10^{-3}W^{-1}$ ]	3	23	1

De los materiales mostrados en el cuadro 7 la más utilizada es la Alúmina ( $Al_2O_3$ ) debido a su menor precio y buena resistencia a altas temperaturas, el desgaste y la corrosión. Por su parte, el Carburo de Silicio ( $SiC$ ) posee mayor conductividad térmica, emisividad y resistencia al shock térmico. Finalmente, el Dióxido de Zirconio ( $ZrO_2$ ) resiste la mayor temperatura ambiental de los mostrados y su coeficiente de expansión lineal térmica es el más alto.

Ahora bien, como se ha señalado previamente los MPI son utilizados en la combustión ya que poseen características que permiten aumentar la eficiencia de este proceso. En este caso, al aplicar este material en la región de combustión se genera una zona híbrida donde la mezcla aire-combustible reacciona en el medio poroso y genera pequeñas llamas al interior de sus poros. Esta nueva zona de combustión puede, a su vez, dividirse en 3 regiones que se detallan a continuación (figura 20):

- En la primera zona se produce el ingreso y precalentamiento de la mezcla aire-combustible.

- La segunda zona se caracteriza porque en ella ocurre la reacción química, liberando energía y gases producto.
- Finalmente, en la última zona se produce la transferencia de calor desde los gases producto al medio poroso.

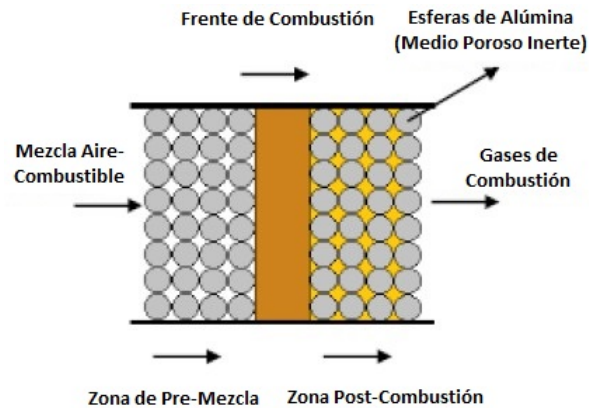


Figura 20: Zonas de combustión al interior del MPI.[Fuente: Silva(2016)]

Una vez que el calor liberado por la reacción exotérmica de combustión, es absorbido por el medio poroso, se produce un transporte de dicha energía en forma de calor por toda la superficie del material. Esto ayuda a que en la zona de entrada de la mezcla, se ceda calor por parte del MPI a los gases reactantes, aumentando así su temperatura antes de combustionar [17]. De este modo, la temperatura del frente de llama también se eleva cada vez más y a causa de ello, el frente de combustión logra una estabilidad considerable, además de una disminución de  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ , que se traduce finalmente en una combustión más completa y eficiente (figura 21).

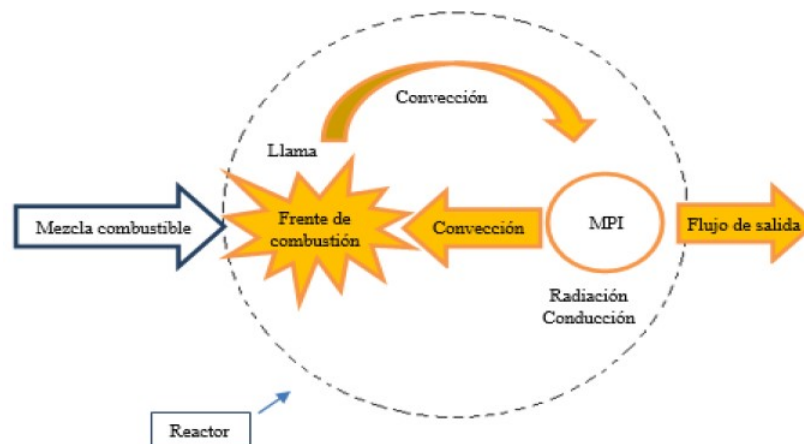


Figura 21: Proceso de intercambio de calor en el reactor de MPI [Fuente: Silva (2016)]

### 3. Emisiones Contaminantes

#### 3.1. Gases Producto

Al estudiar el proceso de combustión de leña, se ha comprobado que se generan esencialmente gases producto y material particulado de distinto tamaño. Estos elementos resultantes tienden a aumentar en número mientras peor es la calidad del proceso de combustión o mayor es la cantidad de humedad contenida en la madera. Las consecuencias de una combustión de mala calidad se traducen principalmente en efectos al medioambiente y la salud de las personas, por un lado, la existencia de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , muestran que existe un aporte al calentamiento global con gases de efecto invernadero. Por otro lado, el material particulado (MP) genera problemas tanto a la atmósfera como a las personas, ya que al ser de tamaño micrométrico, sus partículas quedan suspendidas en el aire a baja altura (smog) y posteriormente, ingresar al sistema respiratorio de distintos seres vivos al inhalar aire.

#### 3.2. Material Particulado

Se denomina material particulado a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. El material particulado forma parte de la contaminación del aire. Su composición es muy variada y podemos encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro sódico, carbón, polvo de minerales, cenizas metálicas, entre otros. Dichas partículas además reaccionan químicamente en el aire.

Se clasifican en función de su tamaño y, en el ámbito de calidad del aire se habla de  $MP_{10}$ , que son las de mayor tamaño, cuyo diámetro aerodinámico teórico es menor o igual a  $10 \mu m$ , por otro lado, también se denomina material particulado fino o  $MP_{2,5}$  a aquellas cuyo diámetro es menor a  $2.5 \mu m$ . Cabe señalar, que cuando se indican valores de concentración de material particulado éstos consideran todos los tamaños de partículas inferiores.

Otra forma de clasificarlos es por su origen, se denomina primario si esta fue emitida directamente al ambiente y secundario si se formó debido a reacciones químicas entre los contaminantes dentro de la atmósfera. Dentro de los primarios se encuentran los de combustión residencial (quema de leña) debido a la combustión del carbón, otras fuentes son los procesos industriales y las emisiones de vehículos ya sean a diesel o gasolina.

Los efectos en la salud producidos por el material particulado se producen al estar expuesto de manera normal, no es necesario realizar una actividad especial ni en un entorno particular, ya que están presentes en el aire que se respira. La exposición crónica aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón.

Recientemente, los científicos han comenzado a centrar sus investigaciones los efectos de las partículas ultrafinas. Aunque estas partículas contribuyen muy poco a la masa de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ , están presentes en gran cantidad. Algunos científicos han propuesto que las partículas ultra finas pueden ser especialmente tóxicas ya que tendrían más probabilidades de penetrar e interactuar con células más profundamente en el pulmón que las partículas más grandes, y se piensa que se mueven rápidamente a tejidos exteriores de las vías respiratorias.

Mientras que las partículas  $MP_{10}$  quedan retenidas en las vías respiratorias, produciendo efectos a nivel de sistema respiratorio, las partículas menores, como el  $MP_{2,5}$ , tienen la capacidad de pasar al torrente sanguíneo, por lo que pueden potencialmente, dañar cualquier órgano o sistema. Se ha demostrado, por ejemplo, que el pireno (hidrocarburo policíclico aromático), afecta al sistema inmune ya que puede inducir la producción de proteínas inmunoregulatoras IL-4 e IL-8, relacionadas con el desarrollo de alergias y de respuestas inflamatorias inducidas por estrés celular [18].

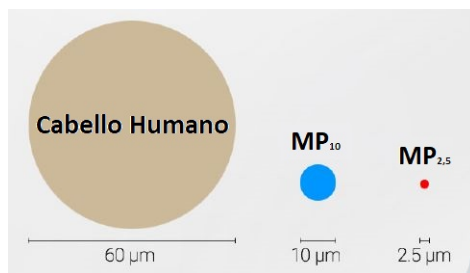


Figura 22: Relación tamaño de cabello humano y material particulado [Fuente: World Air Quality Report 2020 (IQair)].

### 3.2.1. Normativa en Chile

Actualmente, la normativa de calidad de aire establece valores límites diarios y anuales tanto para  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ .

- En el año 1998, se generó el *Decreto Supremo 59* que establece la norma de calidad primaria de  $MP_{10}$ , en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. En particular, se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado respirable cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitorea clasificada como EMRP (Estación de Monitoreo con Representación Poblacional), sea mayor o igual a  $150(\mu g/Nm^3)$ . Por otro lado, también se considera sobrepasada la norma cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos en cualquier estación monitorea clasificada como EMRP, sea mayor o igual que  $50(\mu g/Nm^3)$  [19].

Cuadro 8: Niveles que originan estados de emergencia ambiental para  $MP_{10}$  [Fuente: Decreto Supremo N° 59 (CONAMA)].

Nivel		Concentración 24 horas $MP_{10}$ ( $\mu g/Nm^3$ )
1	Alerta	195-239
2	Pre-emergencia	240-329
3	Emergencia	>330

- El *Decreto Supremo 12*(2012) establece en su artículo N° 3 que para material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ) la norma primaria de calidad del aire es de  $20(\mu g/Nm^3)$  como concentración anual y  $50(\mu g/Nm^3)$ , como concentración de 24 horas. [20].

Cuadro 9: Niveles que originan estados de emergencia ambiental para  $MP_{2,5}$  [Fuente: Decreto Supremo N° 12 (MMA)].

Nivel		Concentración 24 horas $MP_{2,5}$ ( $\mu g/Nm^3$ )
1	Alerta	80-109
2	Pre-emergencia	110-169
3	Emergencia	>170

### 3.2.2. Contexto País

En Chile, a partir del año 1988, comienza a instalarse de forma progresiva en la Región Metropolitana un sistema de monitoreo automático de calidad de aire con representación poblacional. Dicho

sistema se ha expandido paulatinamente al resto de las ciudades del país, muchas de ellas aquejadas por serios problemas de material particulado. Actualmente el sistema cuenta con alrededor de 50 estaciones de medición distribuidas a lo largo del país.

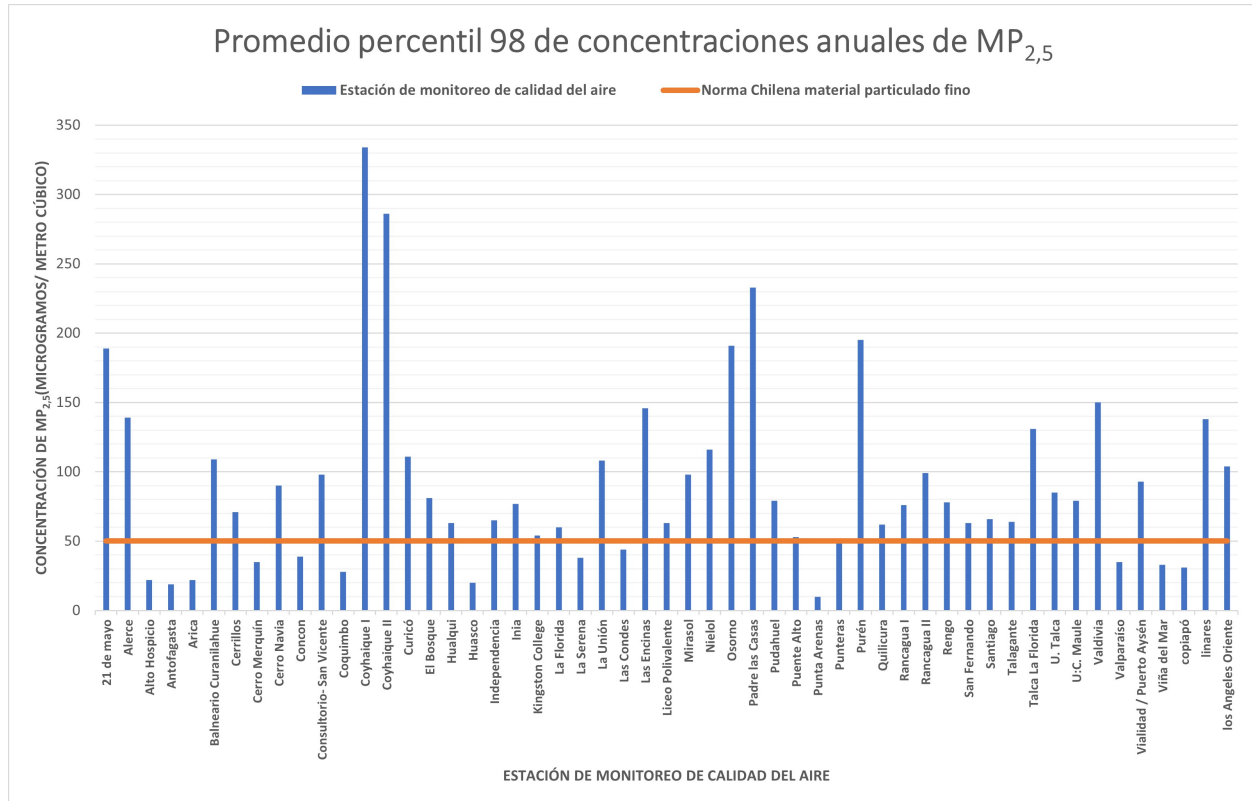


Figura 23: Percentil 98 de las concentraciones diarias de MP<sub>2,5</sub> en estaciones de monitoreo del país el año 2018 [Fuente: Calidad del aire (SINIA MMA)].

Los actuales problemas de contaminación atmosférica y cambio climático están directamente relacionados con emisiones de contaminantes criterio, forzantes climáticos de vida corta y de gases de efecto invernadero (GEI). Estimar estas emisiones, de manera consistente, es un prerrequisito para cuantificar el impacto de las actividades humanas tanto en la salud como en el clima, y así desarrollar estrategias efectivas de descontaminación que permitan abordar ambos problemas de manera integrada.

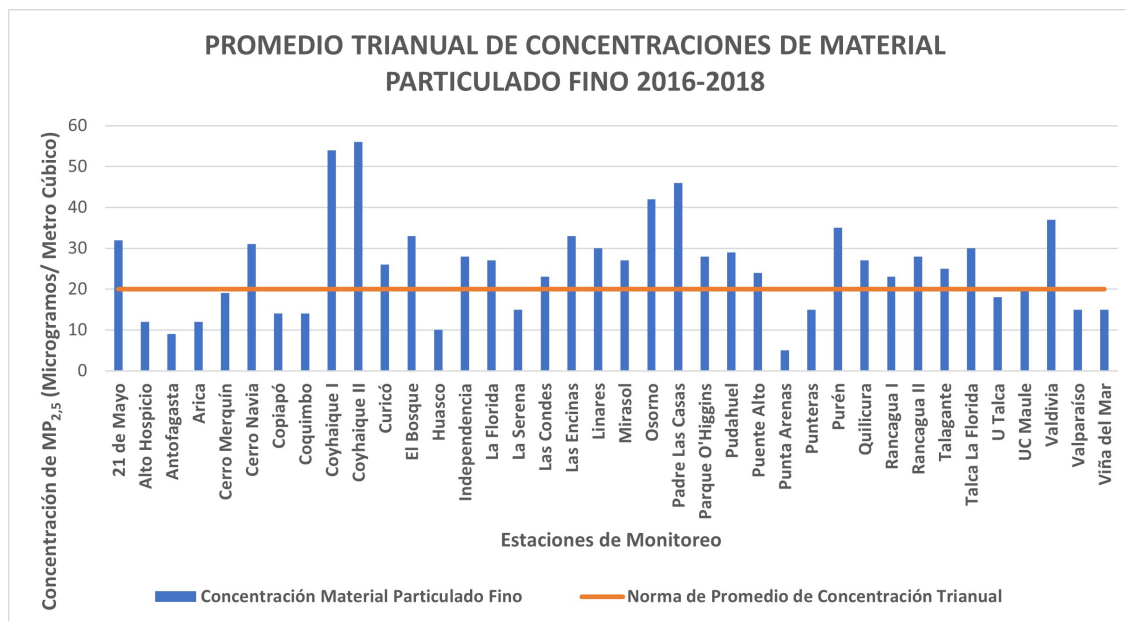


Figura 24: Promedio Trianual de Concentraciones de MP<sub>2,5</sub> en los años 2016-2018 [Fuente: Calidad del aire (SINIA MMA)].

La figura 24 ilustra la concentración de material particulado fino durante el año 2018, de ella puede observarse que la mayor parte de las ciudades de Chile con estaciones de monitoreo de calidad del aire están saturadas de MP<sub>2,5</sub>, cerca del 75 % poseen niveles que sobrepasan los máximos establecidos en la norma. Al mismo tiempo, si se analiza el promedio de concentraciones de MP<sub>2,5</sub> entre los años 2016-2018 también se verifica que más del 60 % de las ciudades en Chile poseen niveles de calidad de aire deficientes.

### 3.2.3. Efectos sobre la Salud.

Como se ha señalado, el tamaño de las partículas se encuentra directamente vinculado con el potencial para provocar problemas de salud. Las partículas pequeñas de menos de 10 $\mu$ m suponen los mayores problemas, debido a que pueden llegar a la profundidad del sistema respiratorio, incluso algunas pueden alcanzar el torrente sanguíneo (Material Particulado Ultrafino o MP<sub>1</sub>).

Diversas investigaciones muestran que algunos grupos de personas son más susceptibles que otras frente a la polución del aire. Esto incluye a los niños, mujeres embarazadas, adultos mayores e individuos con enfermedades de base de tipo cardíacas o pulmonares. Vecindarios y comunidades de estratos socioeconómicos bajos también son más vulnerables a la mala calidad del aire, debido a diversos factores entre los que se cuentan la proximidad a fuentes industriales de contaminantes atmosféricos, problemas de nutrición, estrés, entre otras [21].

El impacto a la salud de la contaminación del aire depende del tiempo de exposición, la concentración de MP<sub>2,5</sub> y el estado de salud de la población afectada. Múltiples estudios científicos han vinculado la exposición a la contaminación por material particulado a una variedad de problemas que afectan tanto al corazón como a los pulmones, entre los que se incluyen:

- Muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas y pulmonares.
- Infartos de miocardio no mortales.

- Latidos irregulares.
- Asma agravada.
- Función pulmonar reducida.
- Síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar.

Cuadro 10: Índice de calidad del aire de Estados Unidos (US AQI) y su concentración equivalente en  $MP_{2,5}$  [Fuente: World Air Quality Report 2020 (IQair)].

Valor US AQI		$MP_{2,5}$ ( $\mu g/m^3$ )	Recomendaciones de salud (Exposición de 24 h)
Bueno	0-50	0-12.0	Calidad del aire satisfactorio con poco o nada de riesgo.
Moderado	51-100	12.1-35.4	Individuos sensibles deberían evitar actividades en exterior. Pueden experimentar problemas respiratorios.
No saludable para grupos sensibles	101-150	35.5-55.4	Toda la población y en particular los individuos sensibles poseen más riesgo de experimentar irritación y problemas respiratorios.
No saludable	151-200	55.5-150.4	Aumenta la probabilidad de efectos adversos a la salud y de agravar problemas al corazón y pulmones para la población en general.
Muy poco saludable	201-300	150.5-250.4	Población en general puede verse seriamente afectado. Grupos sensibles deben restringir actividades al aire libre.
Peligroso	>301	>250.5	Población en general posee alto riesgo de experimentar irritación fuerte y efectos adversos a la salud. Toda la población debe evitar actividades al aire libre.

Utilizando como referencia el cuadro 3 y comparándolo con la figura 2, se puede observar que durante 2018 un gran número de ciudades en el país, y por lo mismo, un alto número de habitantes viven en zonas que tienen una calidad del aire “no saludable” o “muy poco saludable”, llegando incluso en localidades como Coyhaique al nivel de “peligroso” para la salud de sus habitantes.

Por otro lado, al considerar la figura 3 se infiere que en el lapso de tiempo considerado entre los años 2016-2018 un gran número de habitantes del país estuvieron expuestos a niveles de calidad del aire entre “moderado” y “no saludable para grupos sensibles”.

### 3.2.4. Efectos sobre el Medioambiente.

Las partículas finas ( $MP_{2,5}$ ) son la principal causa de visibilidad reducida (bruma) en diversas partes del centro-sur del país, incluidos parques nacionales y áreas silvestres.

Por otro lado, el viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y luego, estas pueden instalarse en el suelo o el agua. Según la composición química de éstas partículas, los efectos de esta sedimentación pueden ser variados [21].

- Lagos y Arroyos pueden aumentar su acidez.
- Cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales.
- Reducción de los nutrientes del suelo.
- Daño en bosques sensibles y cultivos agrícolas.
- Efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas.
- Contribución a los efectos de la lluvia ácida.

### 3.3. Gases Producto de la Combustión

## 4. Extracción Química y Antecedentes de Lavado de Biomasa

Debido al constante uso de la biomasa (tallos, ramas, hojas, troncos, etc.) para combustionar y calefaccionar, se ha buscado hace varios años mejorar sus propiedades como combustible. Para esto se han patentado productos que buscan, por ejemplo, utilizar soluciones para aumentar la velocidad de encendido o de incineración. Del mismo modo, también se han realizado estudios científicos e innovaciones tecnológicas enfocados en disminuir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia de combustión en varios combustibles, incluyendo también la biomasa.

Ahora bien, al momento de intentar aumentar la eficiencia de combustión de un combustible y en consecuencia, lograr disminuir las emisiones producidas por dicho fenómeno hay dos caminos que ayudan a lograr ese objetivo. El primero consiste en realizar mejoras a las condiciones en que se produce la combustión, es decir, el manipular parámetros como la temperatura o el volumen de aire u oxígeno en la reacción, los materiales en la cámara de combustión, entre otros. La otra opción, consiste en tratar el combustible y mejorar sus propiedades de ignición (poder calorífico, contenido de humedad, extracción de componentes químicos, etc.), utilizando para ello, a modo de ejemplo, algunos procesos como los diseñados para refinar el petróleo y convertirlo en gasolina o también, disminuir el porcentaje de humedad en el carbón y la leña mediante el secado, entre otras opciones posibles.

Es por lo anterior, que durante los últimos años se han dado a conocer varias publicaciones enfocadas en tratar la biomasa utilizando diversos métodos de lavado, buscando sumergirla en soluciones (preferentemente agua destilada) para estudiar los efectos que esto tiene en las emisiones contaminantes, al momento de combustionar, y también, analizar los componentes químicos que interactúan entre la biomasa y la solución de lavado.

### 4.1. Extracciones

Las extracciones químicas son estudiadas como una operación de transferencia de masa y como fenómeno físico tiene varias similitudes con las operaciones de transferencia de calor. Una de las principales es el hecho de observar que siempre que existe una falta de equilibrio de un producto en un medio, la naturaleza tiende a redistribuirlo hasta que se establece un *equilibrio* o *igualdad*. Con frecuencia, a esta tendencia se le menciona como la *fuerza impulsora*, mecanismo que se encuentra detrás de muchos fenómenos de transporte que ocurren en la naturaleza. Si se define la cantidad de un producto por unidad de volumen como la **concentración** del mismo, puede decirse que el flujo de un producto siempre se presenta en la dirección de la concentración decreciente, es decir, desde la región de alta concentración hacia la de baja concentración [22]. La expresión que permite obtener la razón de cambio del flujo de un producto se muestra a continuación:

$$\dot{m}_{dif} = -D_{AB} \cdot A \cdot \frac{dC_A}{dx} \quad (1)$$

Esta ecuación mostrada se denomina **ley de Fick de la difusión** y expresa la razón de difusión de masa  $\dot{m}_{dif}$  de una especie química A en un medio en reposo, en la dirección  $x$ . El parámetro  $D_{AB}$  se denomina *coeficiente de difusión* o *difusividad de la masa* de la especie en la mezcla,  $C_A$  corresponde a la concentración de esa especie en la mezcla en ese lugar y la variable  $A$  referida a la superficie de contacto entre soluto y solvente. A modo de observación, la ecuación 1 es bastante similar en su forma a la **ley de Fourier de la conducción de calor** con la diferencia de que las variables principales dependen de la diferencia de temperatura y la conductividad del medio.

Los tipos de extracciones se clasifican según sus características por el estado de la materia en que se encuentren sus componentes, es decir, estas pueden ser sólido-líquido, líquido-líquido, líquido-gas, gas-gas, sólido-gas e incluso, sólido-sólido (no es muy utilizado por lo lento del proceso). Debido a las particularidades del trabajo actual, el estudio se enfocará en las extracciones del tipo sólido-líquido.

Cuando se piensa en realizar una extracción sólido-líquido, las separaciones pueden llevarse a cabo a través de técnicas totalmente mecánicas, como la filtración del sólido a partir de la suspensión en una solución, la clasificación de un sólido por tamaño de particulado mediante cribado o la separación de partículas en un sólido basándose en su densidad [23]. El procedimiento utilizado para separar un producto orgánico de una mezcla de reacción o aislar dicho compuesto de sus fuentes naturales, se denomina *extracción mediante solvente*.

Frecuentemente, en las metodologías de extracción química se aplican pretratamientos a la materia prima de la que se quiere obtener el componente de interés para mejorar la extracción. Asimismo, para recuperar el componente final, se requiere de otras etapas que puedan ayudar a concentrar, purificar o estabilizar el producto. Estas etapas se clasifican de la siguiente manera:

1. **Pretratamiento de la materia prima:** En algunos casos, como cuando se emplean disolventes orgánicos para la extracción es necesario *deshidratar* la materia prima antes de proceder a la extracción. Por otro lado, la *desestructuración o reducción del tamaño de la partícula* (mecánica, térmica, entre otras) consigue eliminar barreras estructurales a la transferencia de materia, lo que favorece la difusión del disolvente a través del sólido para acceder al soluto, aumentando a su vez la velocidad de flujo por los poros del material. Por último, la *reestructuración* (por ejemplo, pellets o láminas) también se aplica en ciertos casos para facilitar el manejo y evitar el apelmazamiento del sólido que dificultaría la extracción [24].
2. **Extracción:** Este paso consiste en llevar a cabo la metodología seleccionada para realizar la extracción, entre los cuales destacan:
  - **Percolación:** Corresponde a la pulverización del disolvente sobre el lecho de sólido [24].
  - **Inmersión Completa:** Como señala su nombre, se refiere al acto de sumergir completamente el sólido en el líquido [24].
  - **Llenado y vaciado:** Similar a la inmersión completa pero cambiando cada cierto intervalo de tiempo el líquido solvente, es decir, se produce un llenado y vaciado intermitente del lecho sólido [24].
3. **Desolventación o Filtrado:** Corresponde a la eliminación o filtración del disolvente para su reutilización tanto del refinado como del extracto resultante [24].

Posterior a la aplicación de un tratamiento previo en la materia prima, comienza el proceso de extracción. En esta parte, se pueden diferenciar tres etapas, independiente de si se utiliza una percolación, inmersión completa o llenado y vaciado como metodología de trabajo. La primera, considera la penetración del disolvente y cambio de fase en el sólido soluble. A continuación, la siguiente identifica la difusión del soluto a través del disolvente contenido en los poros del sólido hasta una interfase. Y Finalmente, la tercera etapa considera la transferencia del soluto desde la superficie de las partículas del sólido al seno del líquido [24].

A medida que pasa el tiempo, desde que inicia la interacción entre el sólido y el líquido en el proceso de extracción, la transferencia o intercambio de compuestos químicos aumenta progresivamente. Sin embargo, este fenómeno tiene un límite dado por la concentración de soluto en el sólido o en el líquido, es decir, se logra un equilibrio en la reacción cuando todo el soluto ha salido del sólido y se encuentra presente en el líquido. O bien, cuando la cantidad de soluto en el refinado supere la solubilidad de éste en el disolvente, lo que implica una saturación del líquido empleado.

Una vez alcanzado el equilibrio, llega el momento de separar el sólido del líquido. Al realizar este proceso se obtienen el *extracto*, constituido por el soluto y el disolvente (líquido saturado), y por otro lado, el *refinado* conformado por el sólido no soluble y una cierta cantidad de disolución retenida en él.

Además de lo anterior, y teniendo en cuenta que el proceso de lixiviación (extracción) es una operación de transferencia de masa, los rendimientos de la misma se ven afectados por la velocidad de transferencia que define la Ley de Fick, por lo que varios parámetros influyen en el rendimiento de la extracción de metabolitos en general, la superficie en contacto, el tiempo de extracción, la temperatura, la relación sólido/líquido, el número de etapas de extracción, y fundamentalmente la naturaleza del disolvente.

Con esta información, es posible realizar un análisis de algunas publicaciones científicas relacionadas al lavado de biomasa, de esta forma, se tendrá más claridad de la metodología utilizada y los parámetros considerados como relevantes en cada uno de ellos. En ese sentido, se encontraron un total de ocho papers que abordan los efectos de este procedimiento en los compuestos químicos obtenidos en el extracto, y también, en las emisiones contaminantes obtenidas al combustionar la masa vegetal correspondiente. Los resultados obtenidos de ese trabajo de recopilación se presentan a continuación.

- **Tamaño de la Biomasa:** En relación al tipo de biomasa, los estudios se enfocan principalmente en utilizar tallos de plantas o arbustos (generalmente residuos agrícolas entre los que se cuentan arroz, trigo o maíz [25] [26]). Únicamente, dos de ellos utilizaron como base para sus experimentos la madera de árboles como el Roble, Abeto o Haya [27] [28]. Ahora bien, en lo que respecta al tamaño de la biomasa ocupada, todos realizan procesos de molido para obtener partículas pequeñas. Las dimensiones de la biomasa declaradas en las publicaciones estudiadas se muestran en la tabla a continuación.

Cuadro 11: Tamaños de Biomasa informados por las publicaciones estudiadas.

Tipo de Biomasa	Formato	Dimensiones
Roble, Haya y Abeto	Pellet	4 - 6 [mm] de diámetro y 22 - 26 [mm] de largo. [27] [28]
Paja de Trigo y Arroz, Tallo de Algodón, Cáscara de Arroz, etc.	Partículas	280 - 450 [μm] de diámetro [25].
Residuos agrícolas	Partículas	1 - 2 [mm] de diámetro y 1 - 1,5 [mm] de largo [26].
Paja de Trigo	Partículas	0,05 - 0,08 [cm], 1 [cm] y 3[cm] de largo [29] [30].
Cáscara de arroz	Partículas	1 - 1,4 [mm], 1,4 - 2,8[mm] y 2,9 - 5,6 [mm] de largo [31].
Paja de Arroz	Partículas	250 - 400 [μm] de largo [32].

De los trabajos nombrados, solo uno ([29]) se enfoca en estudiar el efecto del lavado en diversos tamaños de biomasa, los demás declaran los valores como registro de condiciones experimentales. En ese sentido, las conclusiones muestran un aumento en la velocidad de intercambio químico mientras menor es el tamaño de la partícula, lo que mejora tanto las propiedades combustibles como de composición en la biomasa y finalmente, se traduce en un aumento de la eficiencia en la extracción al poder extraer una cantidad determinada de soluto en menor tiempo.

- **Tipo de Solución:** El agua destilada es la principal solución utilizada en los ensayos de lavado de biomasa. Esto se explica principalmente por su baja conductividad (casi nula) y pH neutro, lo que la hace poco reactiva e ideal para poder estudiar la evolución en el tiempo de la extracción, así como también, la identificación de los componentes orgánicos e inorgánicos que interactúan en el proceso.

Por otro lado, también se utiliza agua de pozo [26], agua potable de ciudad (Sri Lanka) [31] y otros tratamientos que incluyen una solución de ácido diluido o aceite biológico [32]. Estos últimos enfocados a estudiar los efectos en la combustión y emisiones contaminantes.

Algunas conclusiones de los trabajos estudiados muestran que al utilizar agua como solución disolvente de compuestos orgánicos presentes en la biomasa, se genera un intercambio de minerales desde el sólido al líquido, lo que produce un aumento en la conductividad eléctrica de ésta. Es por esto que se destaca el lavado como tratamiento, ya que extrae una gran cantidad de compuestos químicos contenidos en

la biomasa. Los elementos químicos que poseen mayor afinidad con el agua son el potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg), fósforo (P) y el azufre (S) y por lo mismo, son los que se identifican en mayor concentración en el extracto resultante. También se reconoce la presencia de compuestos orgánicos como taninos, fenoles, entre otros pertenecientes al grupo de *extraíbles* presentes en la biomasa.

- **Ciclos de Lavado:** En relación a la eficiencia global de una extracción realizada solamente con una etapa de lavado, en comparación a repetir dicho procedimiento dos o más veces con un mismo volumen de líquido, se sabe que, a causa de la solubilidad del soluto en el disolvente de trabajo, se logra un mejor resultado en el segundo caso [33]. Con respecto al estudio de esta variable en las publicaciones científicas analizadas, únicamente dos de ellas ([27] y [28]) investigan los efectos de aplicar cuatro ciclos de lavado con agua destilada a leños de madera, y destacan la importancia de renovar el agua para aumentar el campo de extracción.
- **Temperatura de la Solución:** En los trabajos de investigación de [25], [30] y [31] se estudia los efectos de la temperatura del disolvente (agua) en la eficiencia de la extracción realizada. Al respecto, los resultados obtenidos en todos muestran que una mayor temperatura aumenta la cantidad de soluto extraído, lo que se traduce en una mejor eficiencia, pero también un mayor poder calorífico superior (HHV), mejoras en la composición de carbono (C), resistencia a la corrosión, ensuciamiento y a la escoria, fueron otros efectos reconocidos en la biomasa tratada.
- **Relación Sólido-Líquido (S:L):** Al conocer la concentración del soluto que se desea obtener, es posible determinar concretamente el volumen de solución a utilizar en la extracción. Sin embargo, este procedimiento se vuelve dificultoso cuando no se tiene información previa (ensayos experimentales) del contenido de soluto buscado, y esto es lo que ocurre al trabajar con biomasa, ya que la concentración de los diferentes compuestos químicos que la conforman es muy variable entre individuos de una misma especie.  
  
De las diferentes fuentes utilizadas como base para este trabajo, únicamente [30] tiene por objetivo buscar un valor óptimo de relación sólido-líquido (S:L) para un lavado más eficiente. Se estudian las proporciones 1:15, 1:20, 1:30, 1:40 y 1:50, señalando entre sus conclusiones el hecho de que a mayor relación S:L es mejor la eficiencia, sin embargo, agregan que el efecto no es tan influyente y que 1:15 es suficiente y recomendado. Por otro lado, las demás publicaciones fueron efectuadas ocupando relaciones S:L con valores variables entre 1:10 hasta 1:80, pero no se enfocaron en los efectos de dicha relación, sino más bien fue utilizada como registro pues no presentaron conclusiones al respecto.
- **Secado:** Este factor tiene gran importancia al considerar los efectos conseguidos al combustionar biomasa, puesto que un bajo porcentaje de humedad se logra mediante un buen proceso de secado. En las publicaciones analizadas no se estudian los efectos del secado, pero si se señala mayoritariamente que este procedimiento se realiza en un ambiente controlado a altas temperaturas (aproximadamente 115°C) durante varias horas y por no más de 24 horas continuas, posteriormente las muestras son depositadas a temperatura ambiente para estabilizar su humedad y peso, a pesar de ello, los valores de humedad obtenidos a causa de este método no son informados.
- **Emisiones Contaminantes:** Los efectos producidos por el lavado de biomasa en las emisiones contaminantes de la misma, es estudiado en [25], [26], [27], [32] y [31]. En general, las conclusiones entregadas señalan que el pretratamiento de lavado de biomasa produce una disminución en las emisiones de monóxido de carbono (CO), potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg), fósforo (P), azufre (S). De la misma forma, los factores de emisión de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), partículas suspendidas totales (TSP), material particulado (MP<sub>2,5</sub>), compuestos fenólicos (BTEXT) y de ceniza también disminuyen su valor. Otra consecuencia positiva del proceso de lavado es una mejora en las propiedades combustibles de la biomasa al aumentar el valor de su poder calorífico superior (HHV).



Para finalizar, se desprende de la información recopilada que buscar extraer compuestos químicos orgánicos e inorgánicos desde la biomasa utilizando agua como solvente de trabajo tiene consecuencias positivas en sus propiedades combustibles, ya que disminuyen las emisiones contaminantes generadas por diversas especies químicas que poseen alta afinidad con el agua y son extraídas en el procedimiento. Por otro lado, también se observa que la eficiencia de extracción mejora al aumentar la temperatura del agua y el número de ciclos o etapas de extracción. Asimismo, al disminuir el tamaño de las partículas que son lavadas se ve mejorada la velocidad de intercambio químico entre soluto y solvente, lo que también aumenta el desempeño del procedimiento.

Por otro lado, la dificultad en determinar las concentraciones específicas de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se quieren extraer desde la materia vegetal, a causa de alta variabilidad de composición incluso entre individuos de una misma especie, impiden calcular la cantidad específica de solvente a ocupar en cada caso, y por lo mismo, no se puede señalar un valor específico para la relación sólido-líquido (S:L).



## Parte II

# Metodología

Este capítulo consistirá en describir la metodología desarrollada durante el trabajo de título para el proceso de lavado de leña y además, se enfocará en mostrar los métodos y protocolos utilizados para caracterizar los extractos que contienen compuestos orgánicos, así como de los ensayos de combustión. Todo esto con la finalidad de poder realizar una comparación de emisiones entre la leña tratada y una línea base que considera sólo leña certificada sin tratamiento, todo esto en un prototipo de estufa de combustión con doble cámara diseñada durante la ejecución del proyecto FONDEF.

- El método de lavado de leña desarrollado, tiene por finalidad lograr una extracción de compuestos orgánicos e inorgánicos utilizando agua destilada. El procedimiento se ejecutó considerando condiciones ambientales ( $18-22^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y 1 atm), agitación manual diaria, una relación de masa entre sólido y líquido de 1:4 y la evaluando el desempeño con uno o varios ciclos de extracción. Para ello fue necesario realizar un seguimiento del pH y conductividad eléctrica del líquido de extracción.
- La caracterización de compuestos químicos orgánicos presentes en el extracto resultante del lavado de leña se desarrollaron en laboratorios pertenecientes al departamento de Química de la Universidad Técnica Federico Santa María; este procedimiento considera varias etapas enfocadas a obtener las muestras concentradas finalmente analizadas.

## 5. Instrumentos y Equipos Utilizados

### 5.1. Humedad



Figura 25: Testo 606-2

Este instrumento mide la humedad de la madera y de materiales de construcción mediante la penetración de dos electrodos. El aparato puede mostrar la humedad del material directamente en porcentaje de peso relacionado con la base seca (peso seco) a través de curvas características.

- **Marca:** Testo
- **Modelo:** 606-2
- **Tamaño:** 119x46x25 mm
- **Peso:** 90 g
- **Temperatura Funcionamiento:** -10 hasta 50 °C
- **Temperatura de Almacenamiento:** -40 hasta 70 °C

Cuadro 12: Descripción técnica de Testo 606-2

NTC	
<b>Rango</b>	-10 hasta 50 °C
<b>Exactitud</b>	± 0,5 °C
<b>Resolución</b>	0,1 °C
Humedad - Capacitivo	
<b>Rango</b>	0 hasta 100 %HR
<b>Exactitud</b>	± 2,5 %HR (5 hasta 95 %HR)
<b>Resolución</b>	0,1 %HR
Medición de Humedad en Materiales	
<b>Rango</b>	0,0 hasta 54,8% en peso
<b>Exactitud</b>	± 1 %
<b>Resolución</b>	0,1
<b>Ciclo de Medición</b>	1 s

## 5.2. pH y Conductividad Eléctrica



Figura 26: Horiba PC 110

Este equipo de medición de calidad de agua puede registrar valores de 7 parámetros simultáneamente (pH, conductividad, ORP, salinidad, resistividad, TDS y temperatura), a través de sus dos electrodos. Permite realizar calibraciones de hasta 5 puntos de pH y 4 de conductividad. Además, posee memoria interna de 1000 datos con salida RS-232 mediante la cual puede conectarse a un computador.

Cuadro 13: Especificaciones técnicas pH y Conductividad Horiba PC-110

pH		Conductividad Eléctrica	
<b>Rango</b>	-2,00 a 16,00 pH	<b>Rango</b>	de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 200 $\text{mS}/\text{cm}$ (k=1.0)
<b>Resolución</b>	0,01 pH	<b>Resolución</b>	0,05 % del rango completo
<b>Precisión</b>	$\pm 0,01$ pH	<b>Precisión</b>	$\pm 0,06$ % del rango completo ( $\pm 1,5$ % del rango completo > 18,0 $\text{mS}/\text{cm}$ )
<b>Tipo Calibración</b>	USA, NIST, Personalizado	<b>Temperatura de Referencia</b>	de 15 a 30 °C (ajustable)
		<b>Coefficiente de Temperatura</b>	de 0,0 a 10,0 % (ajustable)
		<b>Constante de celda</b>	0, 1/1, 0/10, 0
		<b>Configuración de la unidad</b>	Selección automática o manual del rango apropiado $\mu\text{S}/\text{cm}$ o $\text{mS}/\text{cm}$ o $\text{S}/\text{cm}$

### 5.3. Masa



(a) Balanza de precisión Kyntel modelo XY2000-2C      (b) Balanza Kern IFB 300K-2

Figura 27: Balanzas

Cuadro 14: Especificaciones técnicas de la Balanza Kyntel XY2000-2C

<b>Peso máximo</b>	2100 g
<b>Nivel de Precisión</b>	Nivel III
<b>Mínimo Registro</b>	0,01 g
<b>Repetitivo</b>	$\pm 0,02$ g
<b>Error lineal</b>	$\pm 0,03$ g
<b>Estabilización del valor</b>	<3 s
<b>Temperatura de Operación</b>	17,5 a 22,5 °C
<b>Dimensiones</b>	280 x 195 x 65 (largo x ancho x alto) mm
<b>Fuente de Alimentación</b>	Adaptador
<b>Peso Neto</b>	1,5 kg

Cuadro 15: Ficha Técnica Balanza Kern IFB 300K-2

Rango de Peso	Resolución	Dimensiones del plato de pesaje	Material Plato de pesaje	Unidades	Peso
300 kg	10 g	650 x 500 mm	Acero Inoxidable	g - kg	20,5 kg

#### 5.4. Analizador de Gases



Figura 28: Analizador de gases Testo 350

Este equipo está diseñado para el análisis de combustión y medición de emisiones contaminantes para diversos combustibles seleccionables, además se compone de dos unidades que le permiten llevar a cabo su función:

- **Unidad de Control Testo 350:** Posee pantalla gráfica y también es el elemento que sirve para controlar el analizador. Su manejo permite elegir el tipo de aplicación (quemador, turbina de gas, motores y aplicaciones personalizables por el usuario) y por otro lado, puede controlar a distancia la caja analizadora [34].
- **Caja Analizadora Testo 350:** Contiene todos los sensores y electrónica necesaria para la determinación de gases producto de la combustión. Posee un sensor de gas  $O_2$  como base, pero requiere la conexión de al menos un sensor más para su funcionamiento. Los demás gases que pueden medirse mediante la instalación de sensores opcionales son el  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  o  $C_xH_y$ . Para medir altas concentraciones de gas se permite la ampliación del rango de medición (dilución) para proteger los sensores [34].

## 6. Lavado de Leña

El procedimiento de lavado de leña fue desarrollado en dependencias del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María durante el año 2021 y consta de 5 fases (figura 29), en las cuales se realizan mediciones a diversos parámetros como la masa, humedad, pH y conductividad.

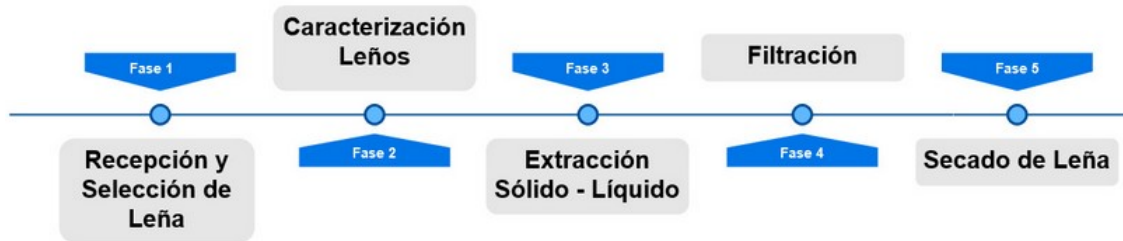


Figura 29: Metodología de lavado de leña [Fuente: Elaboración propia].

### 6.1. Recepción y Selección de Leña

La leña destinada al lavado se presentó en formato de sacos (Figura 30a), entre los cuales fueron separados y marcados individualmente los leños que cumplieran con características como poseer corteza, además de un mayor tamaño y peso. La madera seleccionada se identificó con dos letras (“E” para ensayo extendido y “N” referido al ensayo con  $n$  etapas) con la finalidad de reconocer el tipo de ensayo al cual serían destinados (Figura 30b). Además se asignaron números (Figura 30c) que permitieran establecer un seguimiento individual de los leños.



(a) Leña recepcionada en sacos.



(b) Leña marcada para el ensayo.



(c) Leña con etiquetado individual.

Figura 30: Recepción y etiquetado de leños.

### 6.2. Caracterización de Leños

En esta etapa se realiza una medición individual de humedad (Figura 31a) y peso a los leños seleccionados (Figura 31b), de ésta forma se logra identificar su estado previo. Para cada parámetro (humedad y masa) se realiza al menos tres mediciones y a continuación, se calcula una media aritmética de los valores obtenidos. En este punto se buscan leños de la mayor masa posible (1-2 kg) y aquellos con una humedad

menor a 25 %, para cumplir con la normativa de leña certificada. Una vez se ha finalizado este paso, se seleccionan los leños finales que serán ocupados para llevar a cabo el ensayo.



(a) Medición de Humedad.

(b) Medición de Masa.

Figura 31: Caracterización de humedad y peso de los leños previamente etiquetados.

### 6.3. Extracción Sólido-Líquido

Esta fase del lavado consiste en unir el agua destilada (líquido de extracción) con la leña seleccionada en la etapa 2, para lo cual se trasvasija desde los bidones hacia el silo una cantidad de agua definida previamente (Figuras 32a y 32b). La relación sólido-líquido en que se lleva a cabo este proceso es 1:4, es decir, por cada 1 kg de leña a lavar se utilizan 4 lt (o kg) de agua destilada.



(a) Trasvasije de agua destilada.

(b) Llenado del recipiente.

Figura 32: Procedimiento de trasvasije y llenado del recipiente.

Para comenzar se caracteriza el agua de trabajo mediante la medición de pH y conductividad eléctrica por al menos 2 horas (Figura 33a), todo esto previa calibración del instrumento correspondiente. A

continuación, se vierten los leños en el silo de trabajo y se agita por dos minutos, dando inicio al ensayo y a las mediciones cada 6 minutos de los parámetros pH y conductividad eléctrica (Figura 33b).

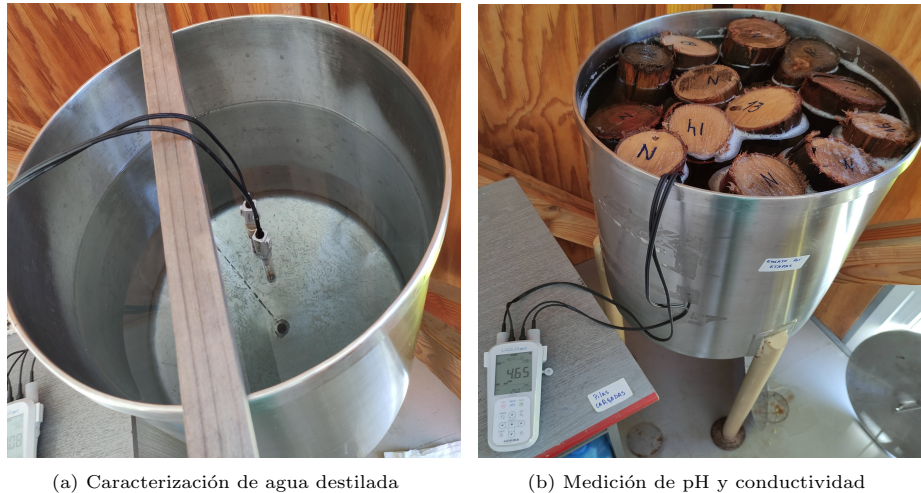


Figura 33: Caracterización del agua previo y durante el ensayo.

Posteriormente y de manera constante, se realiza una agitación manual cada 24 h y los datos son descargados a un computador cada 48 h (Figura 34). Para llevar esto a cabo se pausa la medición y extraen los electrodos para evitar que se dañen; una vez finalizado, se reanuda el registro de datos y se repite hasta que se logra un punto de equilibrio donde la conductividad eléctrica en el agua destilada no varíe su valor durante varias horas.

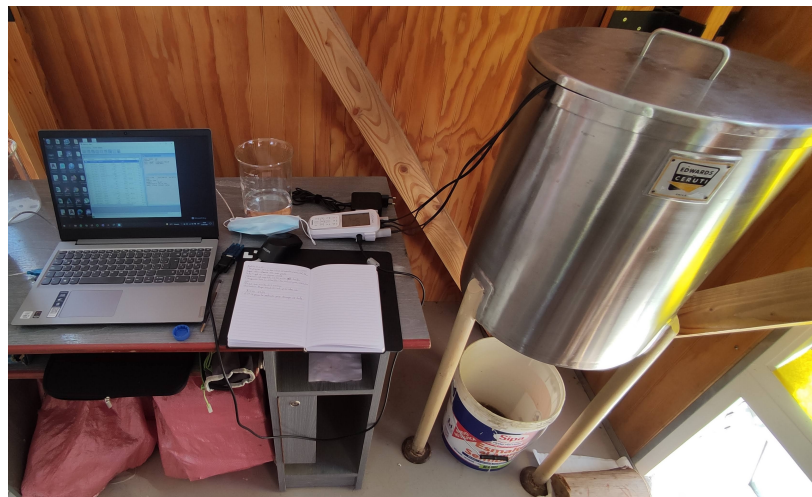


Figura 34: Estación de trabajo y descarga de datos.

## 6.4. Filtración

Cuando se ha llegado a un punto de equilibrio en el pH y conductividad eléctrica del agua destilada (Figura 35a) se procede a separar el líquido del sólido (Figura 35b), con lo que se inicia el proceso

de separación entre la madera lavada y el fluido obtenido. En este punto se generan muestras del extracto resultante para su análisis posterior (Figura 36a y 36b) y se deposita la leña lavada en un lugar adecuado para que comience a secar. La figura 36c muestra los leños al interior del silo de trabajo inmediatamente después de finalizada la filtración.



Figura 35: Procedimiento de filtrado.



Figura 36: Productos resultantes del proceso de extracción.

## 6.5. Secado de Leña

Una vez que se separa la leña del agua destilada, comienza el proceso de secado de la biomasa utilizada en el ensayo (Figura 37). Para ello se mide periódicamente su humedad interna y masa, hasta que alcance valores cercanos a los obtenidos en la etapa 2.



Figura 37: Madera secando después del lavado.

Cuando se ha separado y purificado cada compuesto en un recipiente independiente, aquellas muestras son enviadas a un laboratorio para realizar una espectroscopía por resonancia magnética nuclear (RMN). Dicho paso considera la destrucción de las moléculas y su posterior reconstrucción mediante técnicas adecuadas, lo que finalmente entregará una identificación individual a cada compuesto obtenido del proceso de lavado de leña. Con ello es posible seleccionar la revalorización adecuada del extracto resultante.

## 7. Combustión de leña

La etapa de ensayos de combustión en la estufa residencial prototipo diseñada durante la implementación del proyecto FONDEF, tiene por objetivo poder analizar el efecto en las emisiones contaminantes del proceso de lavado de leña. En esta ocasión el análisis se concentró en las emisiones gaseosas y fue necesario también, combustionar leña certificada a fin de comparar adecuadamente el efecto de la extracción de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Para la implementación fue necesario trasladar e instalar el túnel de dilución presente en el laboratorio de termofluidos en la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María hasta el laboratorio de energías renovables (LER) en el campus José Miguel Carrera. Las mediciones se realizaron con el equipo TESTO 350 y con los registros obtenidos se generaron factores de emisión (FE) de los gases producto de la combustión y también, se efectuó un seguimiento de las temperaturas al interior del hogar de combustión, en los gases de escape y en las paredes externas de la estufa.

### 7.1. Túnel de dilución

La función principal del túnel de dilución, es mezclar con aire ambiente el flujo de humos proveniente de la chimenea de escape producto de la combustión de la leña en la estufa. Para cuando se requiera medir material particulado el túnel, además de diluir, otorgará una condición de flujo isocinético, es decir, que la velocidad del flujo succionado será igual a la velocidad dentro del túnel, con esto se logrará que no exista separación mecánica de partículas que pudiera intervenir en la toma de muestras, y además asegura que exista la misma concentración de partículas en el flujo succionado y dentro del túnel.

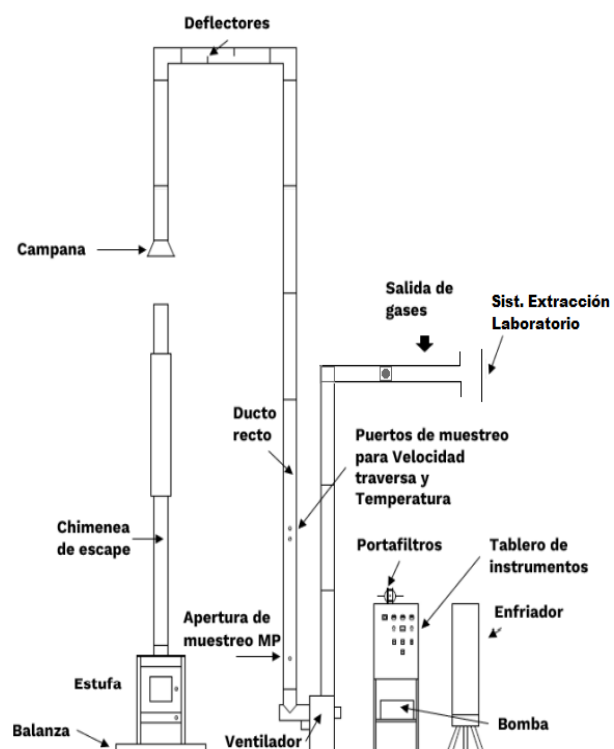
La velocidad de succión, el tiraje y así como otros parámetros están determinados por el tablero de control electrónico, que nos permitirá controlar estas variables cuando se requiera medir material particulado.

En el presente trabajo sólo se usará el túnel de dilución en el flujo de humos proveniente de la combustión de leña. La instalación realizada en el laboratorio se muestra en la figura 38a y el plano descriptivo en la figura 38b.

1. **Chimenea de gases de escape:** Conectado a la estufa, de acero inoxidable, con dos secciones una de 0,15 m de diámetro, aislada con relleno sólido hasta alcanzar los 0,23 m de diámetro, cubriendo gran parte del ducto. En una de las secciones de menor diámetro posee un orificio, el cual cumple como función ser puerto de muestreo para la sonda de presión estática en el ducto primario.
2. **Campana:** Pieza hecha de acero inoxidable con un diámetro mínimo en su extremo ancho de 0,3 m, un acoplamiento estándar de 0,15 m para conectarse a los tubos en el extremo angosto.
3. **Codos y deflectores:** Un total de 4 codos de acero inoxidable de 90°, de 0,15 m de diámetro para conectar el ducto mezclador y ductos estándar rectos.
4. **Ducto recto:** Ducto de acero inoxidable, de 0,15 m de diámetro y de 2,74 m de largo, el cual cumple la función de proporcionar la sección de muestreo del sistema de dilución. Este ducto debe estar instalado al menos a 1,2 m corriente abajo del codo. Posee dos orificios, los cuales son puertos de muestreo, en ellos van instalados el tubo Pitot tipo S y el tren de termocuplas. Además 1,2 m más abajo se encuentra otro puerto de muestreo el cual es ocupado por la sonda de muestreo.
5. **Ventilador:** Ventilador con la capacidad para extraer gas desde un túnel de dilución con el flujo suficiente para mantener la velocidad de dilución y llevar los gases de combustión a la atmósfera



(a) Túnel de dilución



(b) Diagrama túnel de dilución

Figura 38: Túnel de dilución implementado en la sede JMC

## 7.2. Diseño Prototipo de Estufa Residencial

Algunos de los beneficios que trae la implementación de MPI consideran el aumento en las temperaturas alcanzadas al momento de combustionar una mezcla aire - combustible, así como también el favorecer dicha combinación para controlar de mejor manera la llama. Es por lo anterior, que resulta interesante comprobar el funcionamiento al interior de una cámara de estufa residencial y el desempeño de las temperaturas en sus paredes internas y externas, cuando se le inserta un medio poroso. En trabajos de titulación anteriores se han realizado algunas investigaciones buscando la ubicación adecuada del MPI para generar menos emisiones contaminantes [35]; en base a ello se ha generado un prototipo que intenta aplicar dichos conocimientos previos.

En la figura 39 se puede observar la configuración utilizada de MPI con vermiculita instalada en las paredes laterales de la estufa de combustión residencial. El objetivo de ubicarlo en ese lugar es para aprovechar las entradas de aire secundario presentes en el artefacto para precalentarlo al interior del medio poroso antes de ingresar a la cámara de combustión.

Cuadro 16: Características MPI aplicado a la estufa rototipo

Material	Porosidad	Densidad de Poro	Espesor
Carburo de Silicio ( $SiC$ )	80 %	10 - 15 ppi	20 mm

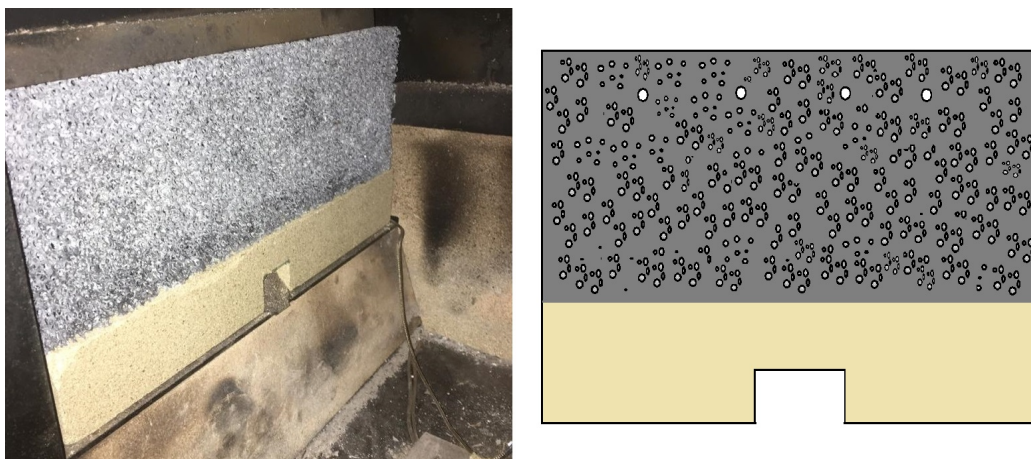


Figura 39: Configuración MPI utilizado en la estufa residencial

## 7.3. Monitoreo de Temperaturas

Para la medición de temperatura fue necesario la instalación de termocuplas tipo K al interior del medio poroso en las paredes de la estufa y también para la medición en la llama y gases de combustión emitidos.

Una de las mejoras que se hizo a las termocuplas ocupadas fue fundir los polos negativos y positivos de éstas mediante un equipo de soldadura adecuadas para este proceso, esto con objetivo de que la señal que entrega la termocupla al data-logger sea mas precisa. Cabe señalar que las termocuplas tipo K tienen un polo positivo de aleación de Níquel-cromo y de polo negativo de Níquel-aluminio. El montaje de las termocuplas al interior del hogar de combustión, así como en las paredes externas y en el caño de escape de gases se muestra en las figuras .

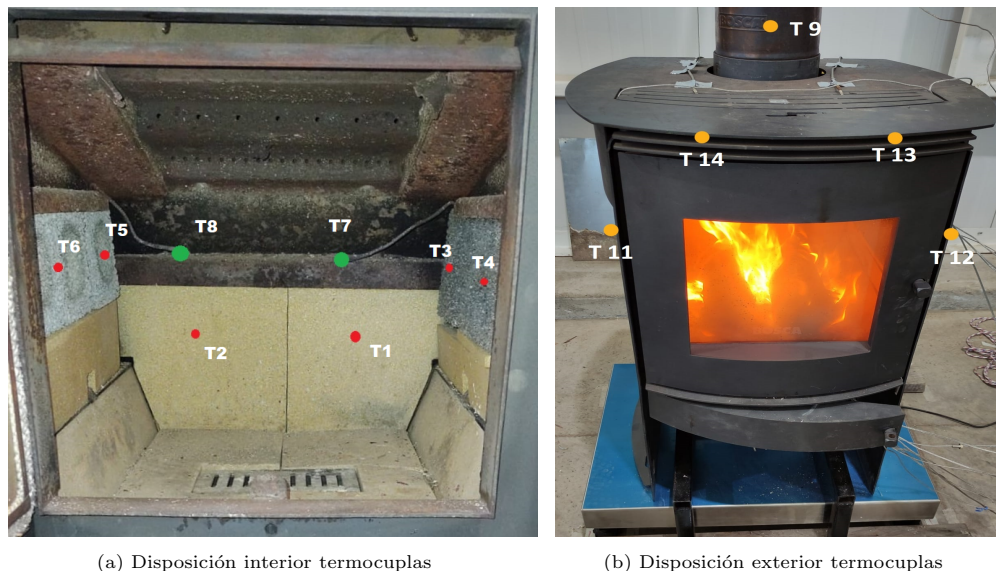


Figura 40: Disposición termocuplas en estufa residencial prototipo

Las termocuplas ubicadas al interior de hogar de combustión (Fig. 40a) se enumeran del 1 al 8, siendo las 6 primeras ubicadas en las paredes laterales y el fondo de la estufa, por su parte, la 7 y 8 registran el valor de la temperatura en la llama emitida en la parte superior.

Los termopares mostrados en la figura 40b se componen de T11 y T12 en las paredes externas laterales, T13 y T14 registran valores de temperatura en el aire primario que ingresa a la cámara de combustión y finalmente, T9 al interior del caño de gases de escape.

#### 7.4. Precauciones a tomar antes del ensayo

- Tener previamente montadas las paredes del conjunto MPI-vermiculita con sus termocuplas insertas dentro de éstas como se ha señalado previamente.
- Mantener en suspensión la estufa gracias al sistema de izaje de gata hidráulica, es importante tener la estufa en suspensión mientras se realicen trabajos de montaje.
- Determinar con anterioridad la masa de la carga a utilizar y además, la humedad de los leños quemados en la carga de ensayo. Es recomendable registrar varias mediciones de humedad (se efectuaron 4 por leño) en distintas partes para tener una mejor caracterización, más cercana a la realidad.
- Comprobar el estado de los termopares y conexiones en data loggers utilizados. Además de corroborar que el notebook se mantenga energizado para no perder datos por problemas de batería.
- Conectar adquisidores de datos a puertos USB del computador, verificar la conexión con el equipo (indicador led verde) e iniciar software asociado (“Personal Daq View” para OMEGA DAQ-56 o, “DAQ Central” para OMEGA USB 2401). Para guardar adecuadamente la información registrada se recomienda crear carpetas según el protocolo almacenado en la carpeta del proyecto FONDEF en el notebook.
- Encender equipo TESTO 350 y mantenerlo conectado a la corriente (enchufado).

- Diagnosticar sensores de medición del TESTO 350 y configurar los parámetros de:
  1. Tipo de combustible: Biomasa
  2. Método de medición: PdC (sólo gases de combustión)
  3. Dilución: Según corresponda.
- Regular el ventilador al máximo para acelerar el flujo de gases y disminuir la temperaturas al interior del túnel de dilusión.
- Iniciar Software “Easy Emission” del analizador de gases TESTO 350 y comenzar registro en condiciones ambientales ( previo al ingreso de la sonda al punto de muestreo en ducto).

## 7.5. Metodología para combustión

La realización de los ensayos de combustión debe hacerse en dos pasos, el primero considera el encendido de fuego con una carga total de aproximadamente 1800 g; una vez encendido debe esperarse un tiempo determinado hasta generar al interior de la cámara de combustión una cama de brasas adecuada para agregar la leña que se combustionará y en dicho momento, cuando se agrega la carga de ensayo debe iniciarse la medición de gases de combustión. A continuación se presentan los pasos realizados para llevar a cabo éstos experimentos.

1. La estufa inicia suspendida y separada de la balanza Kern gracias a una estructura especialmente diseñada para ello.
2. Se inicia el descenso de la estufa hasta posarla por sobre la balanza para registrar el peso del conjunto estufa/caño de escape.
3. Se carga la estufa utilizando una cama de hojarasca, cartón y ramas; por sobre éstas se ubican los leños formando una torre. Es importante, como se ha señalado, conocer la masa total de carga ingresada a la estufa y realizar esta manipulación con cuidado para evitar afectar la medición de masa lo menos posible.
4. Iniciar los sistemas de muestreo (Software de registro de masa, temperatura y concentración de gases) o bien tenerlos encendidos con anterioridad siempre y cuando, se mantenga un registro de la hora en que se comienza el ensayo.
5. Antes de encender el fuego percatarse que la apertura de aire primario esté en su nivel máximo (E), luego comenzar a encender la carga de la estufa y registrar este tiempo.
6. Al momento en el que el fuego se active y por tanto, se haya cerrado la compuerta de la estufa, dejar 5 minutos en el nivel de Encendido (E) y después de ese intervalo de tiempo hay que disminuir al nivel mínimo de entrada de aire (-) el tiraje de aire primario (figura 41). Este paso debe realizarse cuidadosamente ya que podría afectar a la medición de masa.

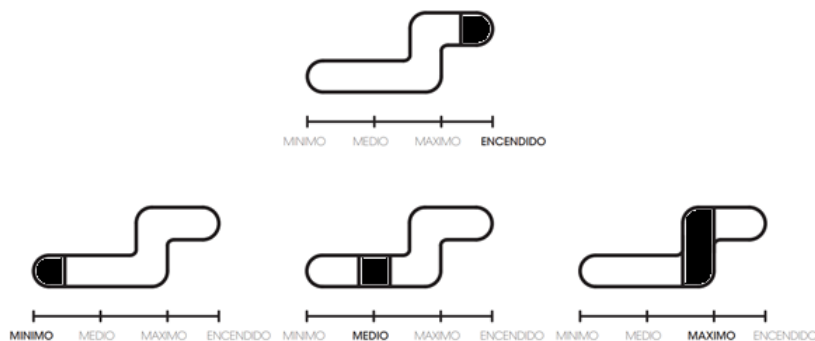


Figura 41: Niveles de apertura del aire primario

7. Cuando se ha generado la cama de brasas, para agregar la carga de ensayo al hogar de combustión se debe ingresar la sonda de medición de gases del TESTO 350 en el orificio de muestreo del túnel de dilución y dejar midiendo continuamente.
8. Verificar durante todo el proceso que los valores de temperatura, concentración de gases y masa sean coherentes a medida que se va consumiendo la leña. 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. En este punto se realizaron registros manuales de masa (además de los efectuados por el programa de la balanza kern) para evitar las pérdidas de información que pudieran ocurrir a lo largo del desarrollo del ensayo.
9. Finalizar el ensayo cuando sólo quede carbón residual y no exista llama visible, depositar en una zona adecuada los restos de leños no quemados durante el ensayo para que se enfríen de manera correcta y no generen problemas.
10. Para dar por acabado el ensayo, junto con limpiar la cámara de combustión misma de la estufa, debe funcionar el ventilador del túnel de dilución por aproximadamente 30 minutos para limpiar impurezas que pudieran quedar del ensayo en los ductos.

## 7.6. Factor de Emisión

Los factores de emisión fueron determinados como el número total de partículas emitidas ( $n_p$ ) o también, como la masa total de una especie gaseosa específica  $i$  emitida ( $m_i$ ), todo esto dividido por la masa residual consumida ( $m_{bw}$ ) durante el experimento de combustión. El número total de partículas emitidas se calculó (Ec. 2) al integrar el producto entre el flujo de aire total ( $\dot{V}_a$ ) y el valor instantáneo de concentración en las partículas emitidas ( $c_p$  indicado en número de partículas por unidad de volumen) durante el período de medición, que en el caso de los experimentos realizados fue de aproximadamente 40 min (2400 s), pues las mediciones eran despreciables pasado dicho tiempo (el fuego se apagó). Finalmente, la masa total de gases emitidos fué determinada (Ec. 3) por integración del producto entre el flujo másico total de aire y la fracción másica instantánea de los gases ( $y_i$ ). Dado que los caudales volumétricos o másicos permanecen invariables durante el experimento, se pueden eliminar de las integrales en todas las ecuaciones. En el caso de las especies gaseosas (Ec. 3) se requiere transformar desde fracción másica a fracción molar ( $x_i$ ) pues este es el valor que provee el analizador de gases. Por su parte el flujo másico puede escribirse también como una función de la presión y la temperatura del flujo de aire que ingresa ( $p$  y  $T$ ).

$$EF_p(\#kg^{-1}) = \frac{n_p}{m_{bw}} = \frac{\dot{V}_a \int_{t=0}^{t=2400} c_p dt}{m_{bw}} \quad (2)$$

$$EF_i(gkg^{-1}) = \frac{m_i}{m_{bw}} = \frac{\int_{t=0}^{t=2400} y_i \dot{m}_a dt}{m_{bw}} = \frac{\dot{V}_a W_i \int_{t=0}^{t=2400} x_i dt}{m_{bw} RT/p} \quad (3)$$

De las ecuaciones,  $\dot{V}_a$  se refiere al flujo volumétrico de aire total,  $W_i$  es el peso molecular de los gases registrados, R corresponde a la constante universal de gases y el subíndice  $i$  señala las especies gaseosas  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$

## Parte III

# Resultados Obtenidos

## 8. Lavado de leña

La metodología de lavado de leña explicada previamente se llevó a cabo realizando dos tipos de experimentos. Uno consideró solamente un lavado con agua destilada, sin que se realice un reemplazo del agua de extracción durante todo el tiempo en que se llevó a cabo (7 semanas). Por otro lado, el siguiente se concentró en realizar el lixiviado de biomasa cambiando periódicamente (cada 7 días) el líquido de trabajo. El objetivo en este caso, es poder comparar el tiempo total y calidad de la extracción (cantidad de compuestos orgánicos extraídos) a través de ambos caminos. A continuación se presentan resultados correspondientes a las diversas variables registradas durante el desarrollo de ambos ensayos realizados.

### 8.1. Humedad y Masa de la Leña

Como se ha señalado, a lo largo del lavado de leña se realizó seguimiento de diferentes parámetros para poder caracterizar de mejor manera la evolución de la leña. En ese sentido el registro de masa y humedad en base seca de la madera antes y después de la extracción se realizó tanto para el ensayo extendido como para el ensayo por ciclos.

La masa total de leña utilizada consistió en 5518 g para el experimento de larga duración y 15044 g en el de etapas. Sin embargo, para el primero no se pudo realizar un seguimiento mayor a la leña utilizada una vez que se finalizó el lavado, ya que dicha madera fue llevada a laboratorio y se le realizaron pruebas que requerían de su separación en trozos de menor tamaño. Por otro lado, si se cuenta con más información respecto del experimento en ciclos, las mediciones fueron realizadas durante los meses de diciembre y enero.

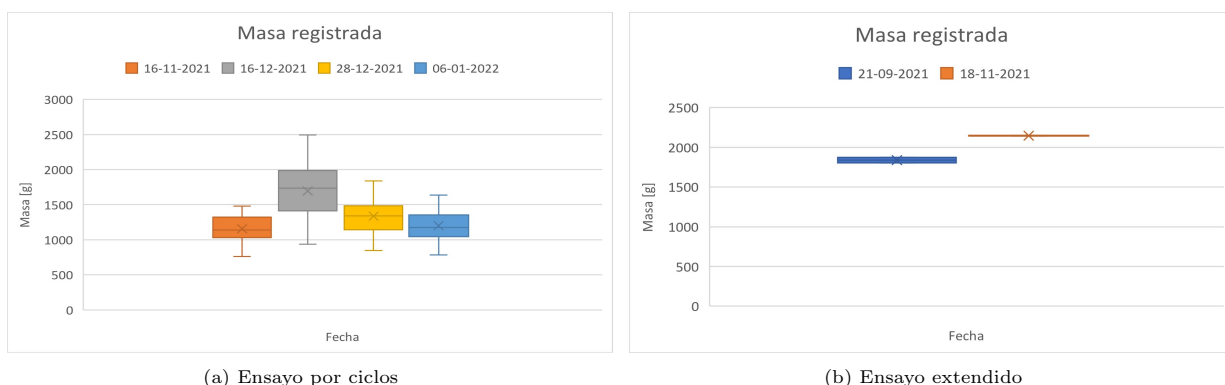


Figura 42: Masa de la leña antes y después del lavado.

Para la figura 42, en ambos gráficos, la primera medición corresponde a la realizada antes iniciar el procedimiento de lavado de leña; las demás, fueron valores registrados inmediatamente finalizado cada ensayo y varias semanas posterior a este último evento. Para el lavado por ciclos (fig.42a) se observa que la masa de cada leño utilizado se encontraba en valores entre 1 - 1,5 [kg] y una vez acabado el pretratamiento de lavado, dicha masa aumentó al rango 1,5 - 2 [kg]. Esto comienza a disminuir lentamente y para las mediciones 3 y 4 (diciembre y enero) ya se reflejan los resultados del secado.

El ensayo extendido (fig.42b) muestra leños de mayor masa ( $\sim 1800[gr]$ ) que el ensayo por etapas, y al finalizar el experimento se registra un aumento por sobre los 2 [kg].

Con respecto a las mediciones de humedad, se realizaron también cuatro registros en las mismas fechas que las señaladas para la masa (Figura 43). En particular, la leña que ocupó en el ensayo estaba seca y con un porcentaje de humedad menor a 25%, por lo que según la normativa Chilena puede ser considerada como leña certificada. Se observa un aumento en la humedad en todos los leños y una posterior disminución a causa del secado.

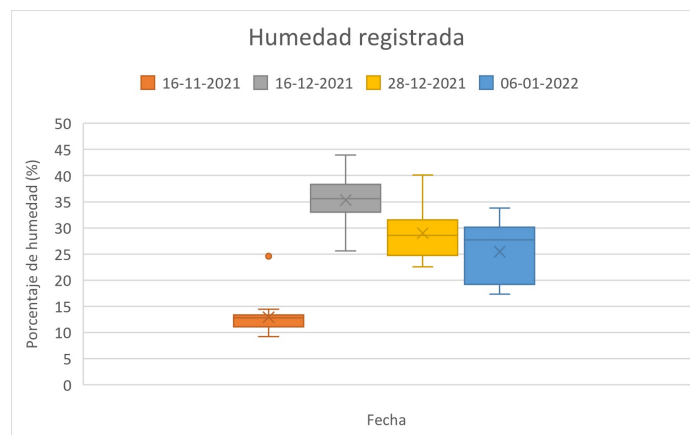


Figura 43: Humedad de la madera utilizada

En base al gráfico de dispersión adjunto, al comienzo se nota claramente que la madera utilizada contiene una humedad que ronda el 10 - 15 %, posteriormente se ve un comportamiento bastante similar al de la masa con un aumento notorio cuando finaliza la extracción y a medida que se seca la leña, disminuye su porcentaje de humedad. Del mismo modo, se observa como después de casi un mes de secado la madera lentamente vuelve a su estado previo, cada vez con más leña bajo los niveles de humedad requeridos para considerarlos certificados.

## 8.2. Temperatura del Agua

Como se ha señalado previamente, los ensayos de lavado de leña se llevaron a cabo en dependencias del Laboratorio de Energías Renovables en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María, en la ciudad de Viña del Mar, Chile. Es por esto que las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollaron son las regulares del clima asociado a la ciudad en época de primavera - verano, es decir, la temperatura ronda los 18-20 °C, la presión es atmosférica a nivel del mar (1 atm) y la humedad relativa ronda el 50%.

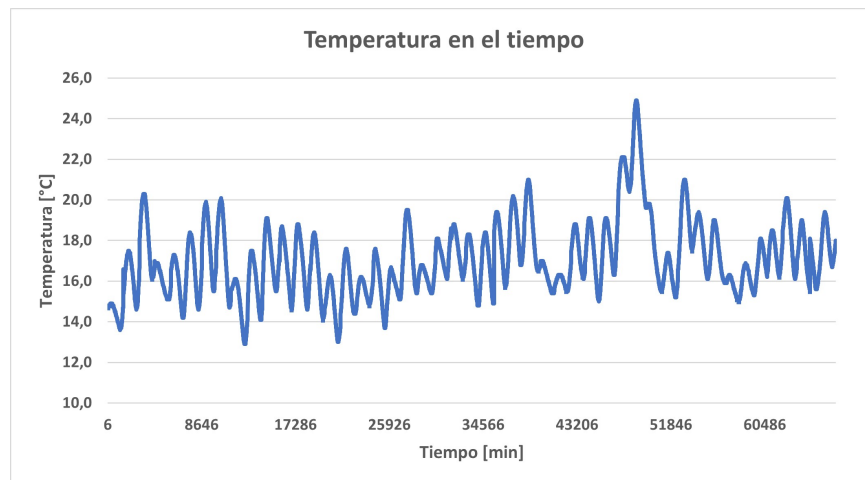


Figura 44: Temperatura del agua ensayo extendido

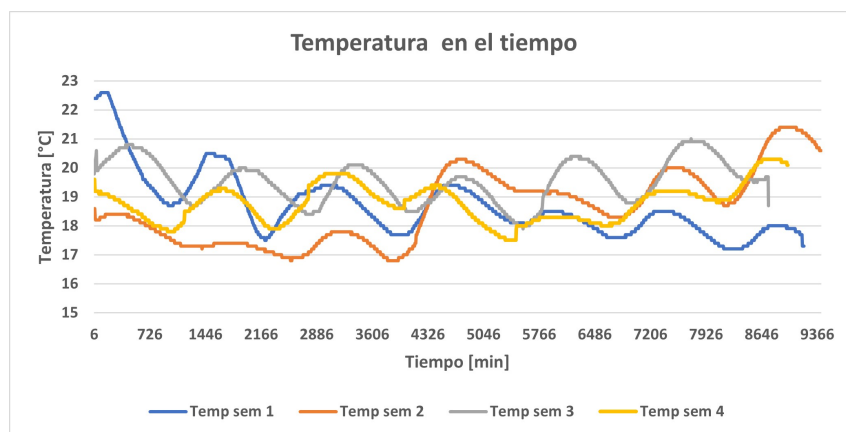


Figura 45: Temperatura del agua ensayo por ciclos

En las figuras 44 y 45 se puede ver el comportamiento de la temperatura del agua destilada utilizada para la extracción; de ellas se infiere que las variaciones entre el día y la noche, así como entre días consecutivos no superaron los 5 °C y en general, se mantuvieron en el rango de 13 - 25 °C en el caso del ensayo extendido y 17 a 23 °C para el ensayo por ciclos.

En base a la bibliografía estudiada, se puede señalar que dichas variaciones de temperatura mostradas no influyen en mayor medida el desempeño de la extracción, pues se registra un aumento en los rendimientos y se favorece la extracción de manera más notoria cuando se compara temperaturas con diferencias cercanas a 25 °C. Al mismo tiempo para temperaturas como las mostradas con una diferencia no mayor a 5 °C la mejora en eficiencia no se hace notoria [25]. Sin embargo, los mismos estudios ([25], [30]) coinciden en que la temperatura del agua en que se realiza el lavado tiene un alto impacto en todas las propiedades combustibles de la madera ya que se aumenta la remoción de varios minerales, destacando dicho desempeño a los 40 °C y a los 80 °C. Sin embargo, debido al costo energético, además de la dificultad de implementar un método para mantener el agua a altas temperaturas de forma constante es que los ensayos desarrollados en este trabajo de título no consideraron el poder manipular éste parámetro en particular, pero sí se realizó un seguimiento continuo.

### 8.3. pH

El comportamiento del pH a lo largo del desarrollo de ambos experimentos es bastante similar y tiende a estabilizarse después de dos a tres días. En el caso del ensayo extendido el promedio del pH en el agua destilada medido en la caracterización previa es de 5,9 y para el ensayo por ciclos fue de 6,7 para el primero, 6,1 en el segundo, 6,3 en el tercero y 6,4 en la cuarta etapa. La caracterización del agua para el ensayo extendido fue de 24 horas y para el ensayo por ciclos se realizó durante 2 horas en el primer ciclo y por 15 minutos en los demás ciclos. En las figuras 48 y 49 se muestra una vista aumentada del registro tomado.

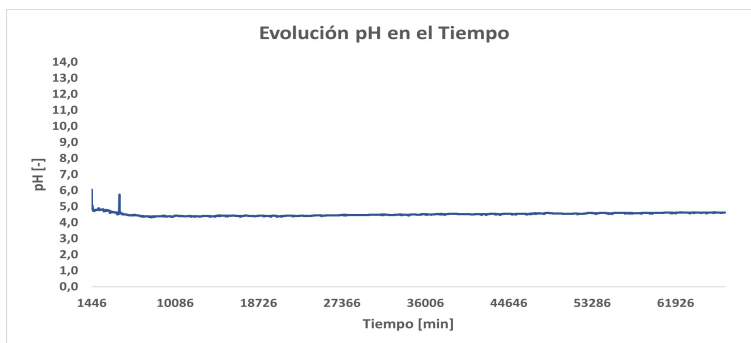


Figura 46: Comportamiento pH Ensayo Extendido

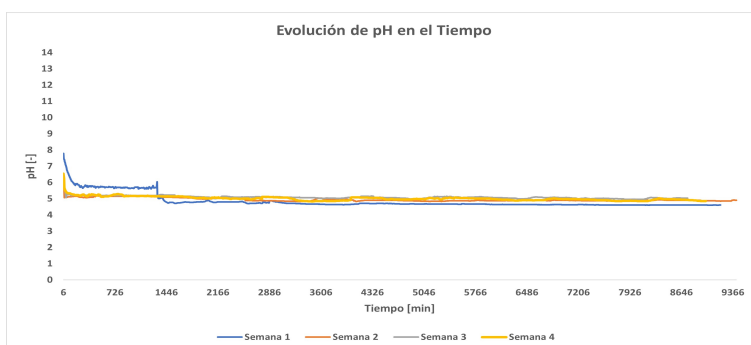


Figura 47: Comportamiento pH Ensayo por Ciclos



Figura 48: Vista aumentada comportamiento pH ensayo extendido

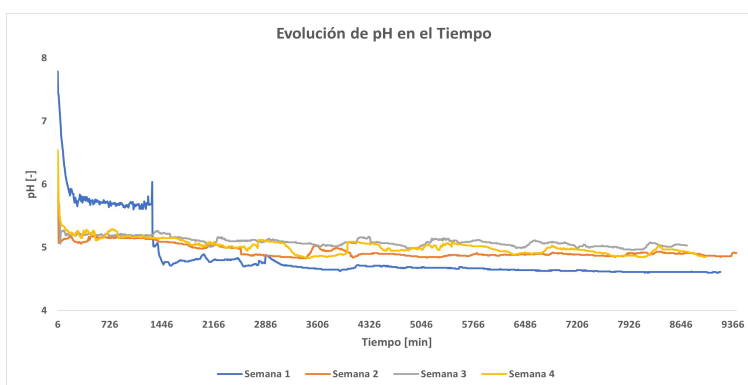


Figura 49: Vista aumentada comportamiento pH ensayo por ciclos

Para el ensayo extendido se observa un mínimo aproximadamente a las 100 horas de iniciado, posteriormente comienza un aumento leve pero continuo hasta estabilizarse en un valor cercano a el 4,5. Por su parte, en el ensayo por ciclos el comportamiento es bastante similar, sin embargo durante el primer ciclo se registra un mínimo cercano a 4,7 a las 26 horas y posteriormente se logra un valor más o menos constante en torno a dicho valor. En comparación a los demás ciclos, el primero logra valores de pH inferiores pero tarda más tiempo en llegar a su mínimo, lo que se puede explicar exactamente por ser el que dió inicio al proceso, por lo tanto la madera contenía una mayor concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos en su interior, los cuales interactuaron a lo largo de las horas con el agua destilada.

La disminución del valor de pH y su posterior estabilización, dan a entender que el tipo de compuesto extraído desde la leña tiene características ácidas, lo que se condice con la literatura al respecto [36] que señala un valor de pH 4,0 - 4,4 en la madera. Para poder determinar específicamente los diferentes tipos de compuestos químicos extraídos del proceso de lavado de leña se diseñó una metodología enfocada a lograr dicho objetivo y aquellos resultados serán informados en secciones posteriores.

## 8.4. Conductividad Eléctrica

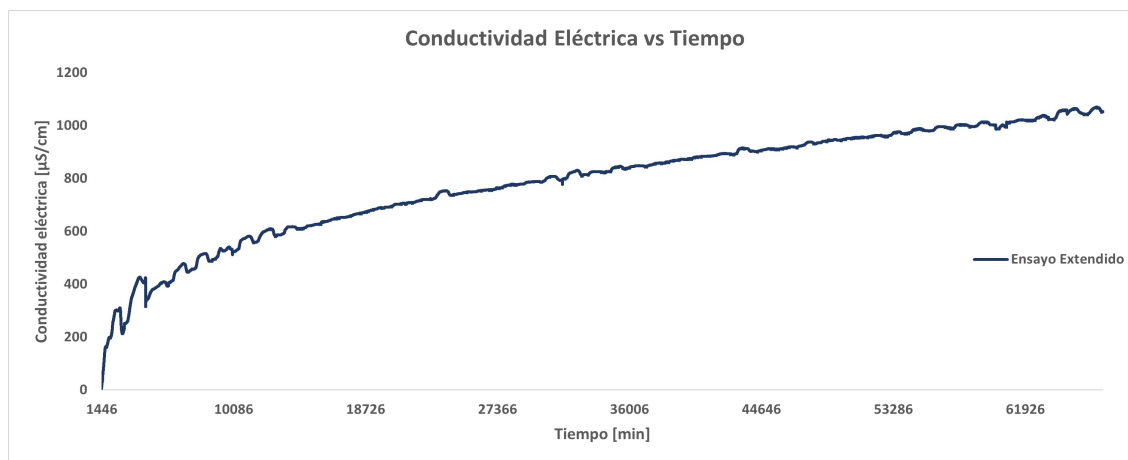


Figura 50: Conductividad Eléctrica en Ensayo Extendido.

La conductividad eléctrica promedio del agua destilada utilizada para el ensayo extendido se calculó en  $31 \left[ \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right]$  y para el caso por etapas la conductividad obtenida fue de 15, 3, 4,5 y  $3 \left[ \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right]$  respectivamente.

Puede verse en la figura 50 que la mayor velocidad de extracción se da durante los primeros 11 días aproximadamente (16000 min), pues desde ese punto en adelante la tasa de cambio de la conductividad disminuye progresivamente. Durante dicho tiempo se alcanza aproximadamente el 50 % del valor máximo registrado, y a modo de comparación, el 80 % se alcanza recién a los 25 días. Este comportamiento se explica en parte por la saturación del agua destilada, ya que a medida que el tiempo avanza es menor la cantidad de compuestos orgánicos que el agua puede contener y al mismo tiempo, existe un menor número de compuestos hidrófilos interactuando con el líquido de extracción. Otro aspecto importante de destacar es el hecho de que se observa un comportamiento muy similar a un gráfico logarítmico lo que tiene bastante parecido a los resultados entregados por publicaciones revisadas [28].

Para el caso mostrado en la figura 51 es importante destacar lo que ocurre en el primer ciclo de lavado en comparación a los demás; la conductividad máxima alcanzada es alrededor de un 100 % mayor a la segunda etapa y esa diferencia aumenta al compararla con el tercer o cuarto ciclo de extracción. Además de ello, un porcentaje superior de la concentración total de compuestos orgánicos que se mueven desde la madera al agua destilada, se obtiene en los primeros días y en particular en la primera semana de iniciado el proceso, lo que se ve reflejado con la curva de conductividad que alcanza valores más elevados en general, que las semanas 2,3 y 4. En relación a las demás etapas del proceso, se nota una disminución continua en las concentraciones lo cual coincide con lo señalado por otros estudios [28], ya que al finalizar cada ciclo, existe en la madera una menor presencia de compuestos hidrófilos capaces de interactuar con el agua destilada.

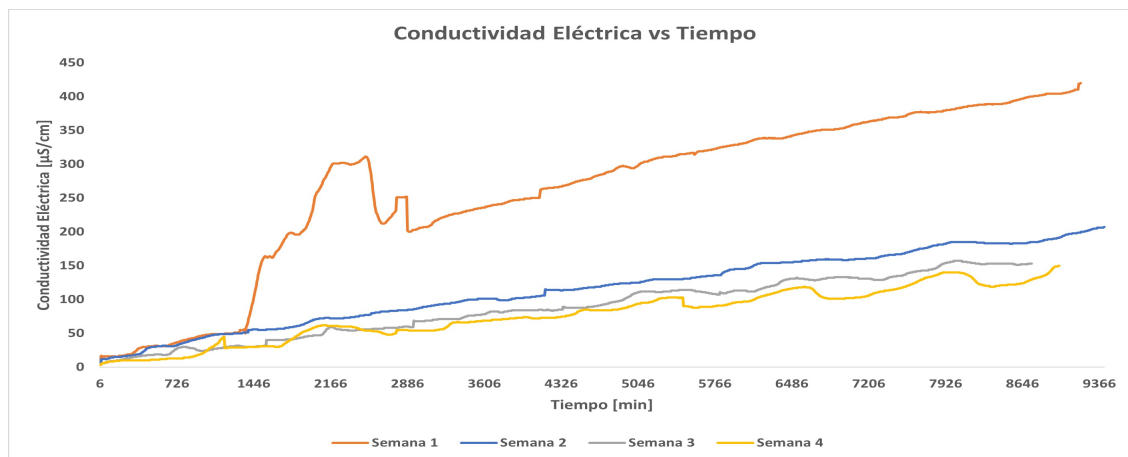


Figura 51: Conductividad Eléctrica en Ensayo por Ciclos

A diferencia del ensayo extendido, en el lavado por etapas se muestra un comportamiento mucho más lineal, únicamente en el primer ciclo se observa una curva más cercana a un gráfico de tipo logarítmico sin embargo, debido a la menor cantidad de días de medición dicha forma no se ve reflejada. Además el hecho de que los leños utilizados en el ensayo por etapas sean de una masa menor e individuos más jóvenes que los seleccionados para el ensayo de larga duración, también es un factor a destacar, pues a causa de ello es probable que contengan menores concentraciones de compuestos orgánicos y por lo mismo, la tasa de extracción puede verse afectada.

En relación a ambos experimentos llevados a cabo y sus resultados es posible señalar algunos aspectos destacables. Las condiciones ambientales bajo las cuales se llevaron a cabo fueron bastante similares dada la época del año en que se desarrollaron; por otro lado, en ambos se produjo una extracción notoria de compuestos orgánicos hidrófilos y la evolución de la conductividad eléctrica y del pH en el tiempo reflejan aquella situación, para identificar dichos compuestos se guardaron muestras de los extractos correspondientes que más adelante se enviaron a laboratorio.

Según lo estudiado en la bibliografía adjunta, es posible plantear que el extracto resultante del lavado de leña puede contener compuestos orgánicos pertenecientes a la familia de los fenoles como los lignanos, flavonoides o taninos, entre otros; así como también azúcares y minerales, dentro de los que destacan el Potasio (K), Sodio (Na), Magnesio (Mg), Fósforo (P) y Azufre (S). Muchos de ellos, se cree, tienen relación con una disminución en la eficiencia de la combustión de leña pues al interactuar a altas temperaturas tienden a generar compuestos nocivos para la salud como el MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, PAH, BTEX y demás compuestos volátiles [27]

Para finalizar el análisis, se hace necesario destacar en el caso de ambos ensayos la relación que existe entre la cantidad de agua utilizada para el lavado de leña, el tiempo y la eficiencia de la extracción. Es claro que el experimento por ciclos es mucho más rápido pues toma casi la mitad del tiempo y técnicamente obtiene una mayor cantidad de compuestos orgánicos, según señala la teoría relacionada. Por su parte, el ensayo extendido utiliza una menor cantidad de agua para su procedimiento lo que se vuelve relevante en el contexto actual, donde existe escasez de agua a lo largo del país. Es por esto también, que independiente el tipo de extracción que se lleve a cabo, pues dependerá de las prioridades a establecer es imprescindible poder revalorizar el líquido resultante y para ello será muy importante, en el uso final del extracto, el poder reconocer adecuadamente los compuestos orgánicos obtenidos.

## 9. Ensayos de Combustión

Los ensayos de combustión mostrados a continuación, se realizaron durante el mes de enero 2022 en las dependencias del Laboratorio de Energías Renovables (LER). En cada uno, se consideró una carga de encendido para generar brasas y aumentar la temperatura al interior del hogar de combustión; llegado este punto se da inicio a la toma de muestras y al ensayo en cuestión. Se quemaron, al interior de la estufa de combustión con medio poroso, un total aproximado de 4 kg de leña, considerando 2 kg de leña lavada y 2 kg con leña certificada sin lavar. El tiempo en que se llevó a cabo cada uno de los ensayos fue de aproximadamente 38 minutos.

Las mediciones realizadas consideraban el seguimiento de la temperatura en la llama, en las paredes interiores y exteriores de la estufa de combustión; además de ello se registraron las emisiones contaminantes gaseosas y el decaimiento de masa. Con estos registros se obtuvieron factores de emisión que permiten cuantificar, comparar y evaluar los contaminantes generados.

### 9.1. Masa

En la figura 52 se muestra la evolución de la masa registrada durante el desarrollo del ensayo, dichos valores fueron obtenidos utilizando la balanza Kern IFB 300K-2 con un software diseñado para examinar y anotar cada 1 [s] el valor indicado por el instrumento. Además de ello se realizó un registro manual cada un minuto de los mismos valores en caso de que el software presentara fallas. Las curvas mostradas, consideran únicamente la masa de leña agregada para el ensayo, dicho valor se corroboró masando previamente la carga a agregar y comparándolo con el valor generado por diferencia en la masa indicada por la balanza al instante antes y después de integrada la madera del ensayo al hogar de combustión. Por otro lado, la curva mostrada sugiere un comportamiento que se puede aproximar a una línea recta.

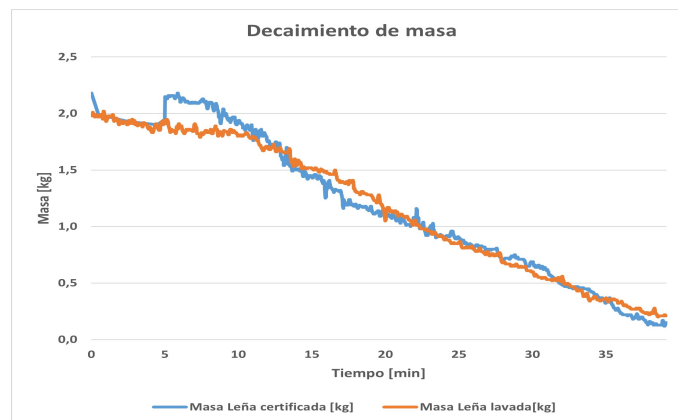


Figura 52: Decaimiento de masa en ensayos con y sin leña lavada.

Cuadro 17: Tasa de quemado para leña lavada y no lavada.

	Leña Lavada	Leña Sin Lavar
Tasa de Quemado [kg/h]	2,730	3,114

Con la información obtenida respecto a la masa de combustible a lo largo del ensayo, se puede generar una tasa de quemado (cuadro 17), el cual indica la cantidad (masa) de combustible quemado o

consumido por cada hora de reacción, de esta manera se puede evaluar el consumo de leña. Los valores calculados en los diferentes tipos de leña, son bastante similares a los señalados en otros estudios [37] [38] con condiciones parecidas, ya que se informa también la utilización de estufas de calefacción residencial y túnel de dilución. De la misma manera, los tiempos y masas de ensayo son bastante cercanos.

## 9.2. Temperatura

Como se ha señalado en la metodología asociada a los ensayos de combustión, al interior y exterior de la estufa de calefacción residencial se instalaron termocuplas para poder medir y registrar la temperatura en las paredes, en la llama producida por la combustión de la madera y en los gases generados inmediatamente después del templador.

Los resultados presentados a continuación se enfocan en los mismos instantes de tiempo estudiados para las emisiones contaminantes (desde el ingreso de la masa de ensayo durante  $\sim 40$  [min]), sin embargo, existe un registro más amplio del comportamiento de la temperatura al interior y exterior de la estufa desde que se comenzó a preparar el ensayo hasta que se consumieron todas las brasas.

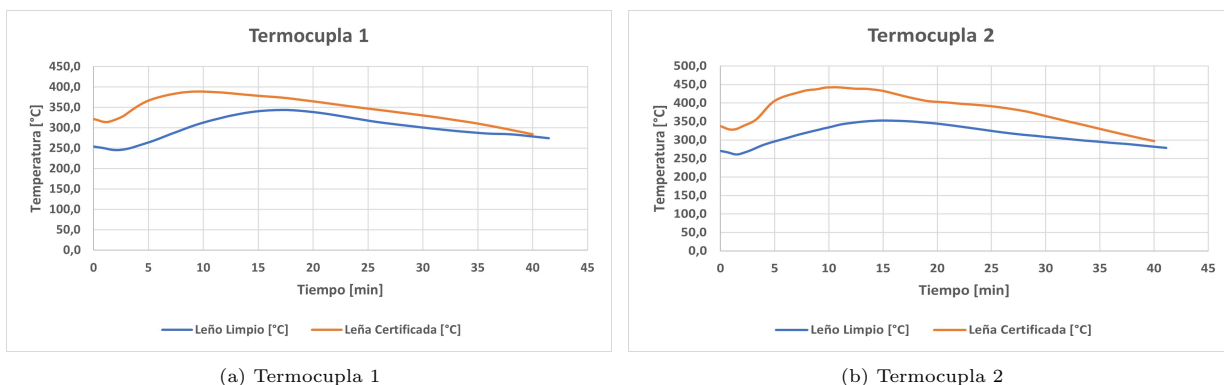


Figura 53: Temperaturas registradas por termocuplas 1 y 2.

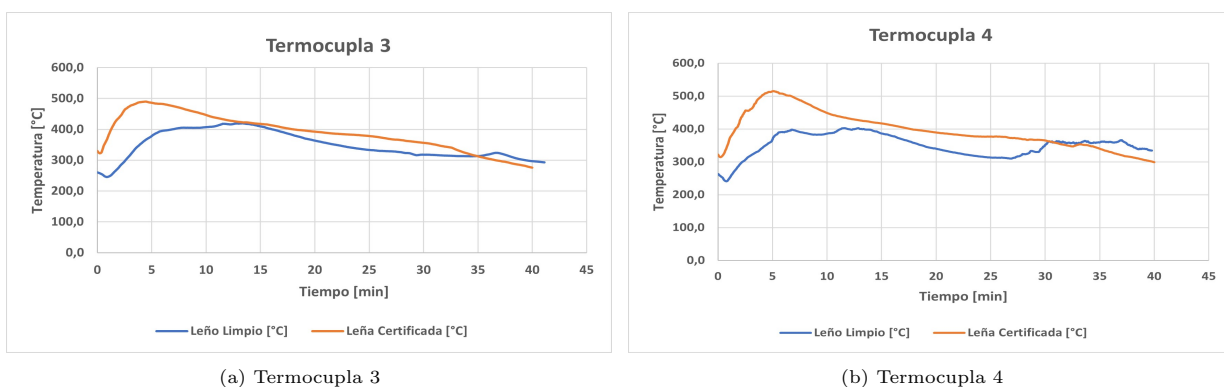


Figura 54: Temperaturas registradas por termocuplas 3 y 4.

De los sensores instalados, los dos primeros (Figuras 53a y 53b) se ubican al interior de las placas de vermiculita presentes en la cara interna posterior de la cámara de combustión. Por su parte, las

termocuplas 3, 4, 5 y 6 (Figuras 54a, 54b, 55a y 55b) están instaladas en las caras internas derecha e izquierda respectivamente de la estufa, al interior de las cerámicas de medio poroso.

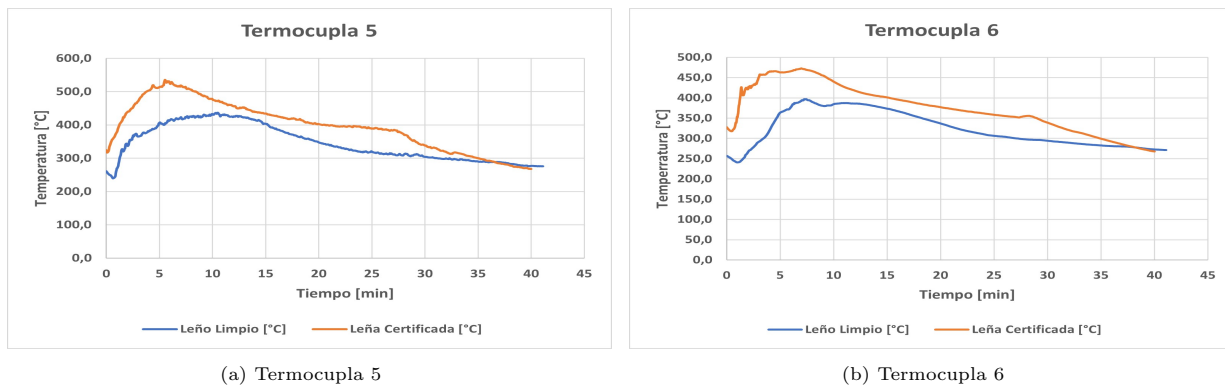


Figura 55: Temperaturas registradas por termocuplas 5 y 6.

En base a las temperaturas registradas por estas 6 primeras termocuplas mostradas, se observa que la temperatura alcanzada en las paredes internas se ubica entre los 250 - 500 [°C], incluso se nota una diferencia en los valores estudiados para los termopares ubicados en la vermiculita y en las que se ubicaban al interior del MPI.

Es destacable, como una diferencia mostrada entre ambos tipos de combustible, el hecho de que la madera certificada sin lavar alcanza valores máximos de temperatura mayores a los logrados por la leña lixiviada al interior del hogar de combustión. Por otro lado, se observa que alrededor de los 35 minutos de ensayo ambas temperaturas son iguales y comienza un descenso más acelerado en la leña certificada.

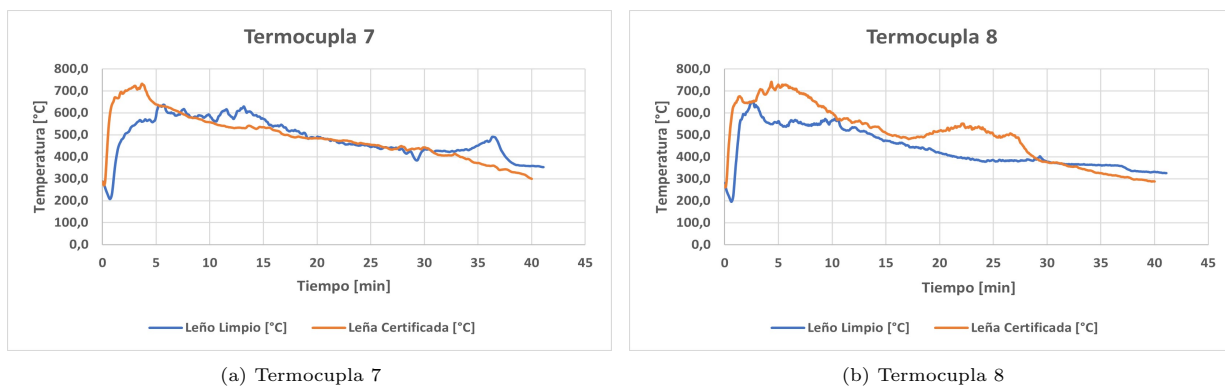


Figura 56: Temperaturas registradas por termocuplas 7 y 8.

Las termocuplas 7 y 8 (Figuras 56a y 56b) muestran el registro de temperatura en la llama generada por la madera al ser quemada, previo al ingreso de los gases al templador. Por su parte, la Figura 57, señala lo detectado por la termocupla 9, la cual está instalada al comienzo del caño de gases de escape, inmediatamente a la salida de la estufa y el templador.

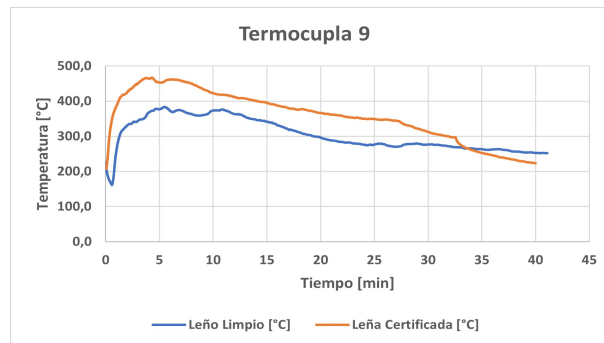
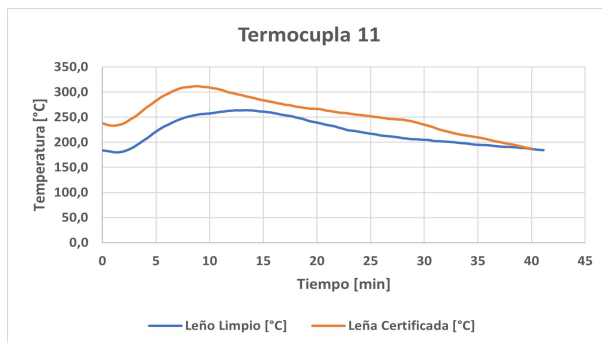


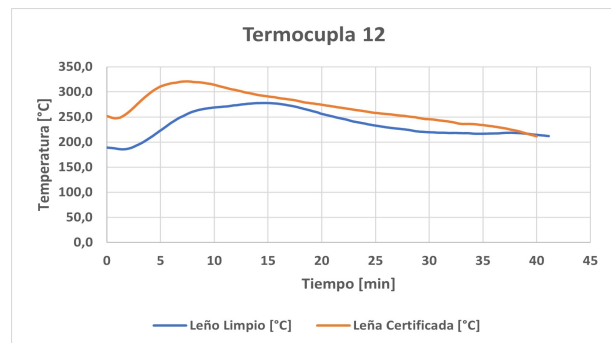
Figura 57: Temperaturas registradas por termocupla 9.

Este registro muestra temperaturas de llama muy similares entre los dos tipos de madera ensayados, siendo mayores las alcanzadas por la leña certificada durante los primeros 10 minutos de ensayo. Una vez que salen del templador los gases de escape, se nota un descenso un tanto más marcado, en comparación a las termocuplas 7 y 8, en el combustible lixiviado.

Finalmente, las termocuplas 11, 12, 13 y 14 fueron instaladas en las paredes externas de la estufa spirit 380. Los termopares 11 y 12 (Figura 58) fueron ubicadas en las paredes externas izquierda y derecha. La número 13 y 14 (Figura 59) registraban valores para el aire primario que ingresaba a la cámara de combustión.



(a) Termocupla 11



(b) Termocupla 12

Figura 58: Temperaturas registradas por termocuplas 11 y 12.

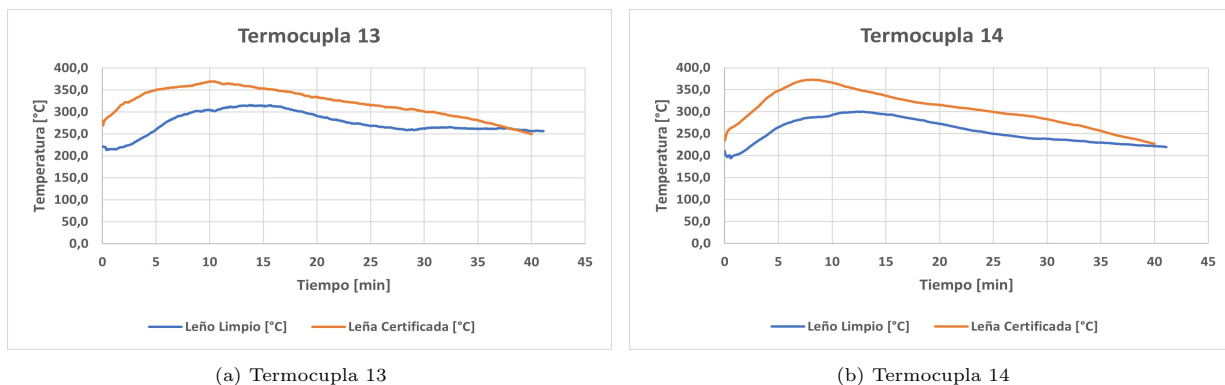


Figura 59: Temperaturas registradas por termocuplas 13 y 14.

En base a los resultados obtenidos, relacionados a las temperaturas alcanzadas al interior y exterior de la cámara de combustión se observa que la leña certificada sin lavar alcanza una temperatura máxima mayor a la leña lavada. Esto hace pensar que el combustible sin tratamiento pudiera entregar una cantidad de energía por radiación mayor a las paredes de la estufa y por lo tanto, al ambiente.

Las termocuplas enfocadas a registrar la temperatura de los gases de combustión (Fig. 56 y 57) muestran máximos que rondan los 700 [°C] en ambos tipos de combustible, junto con ello, se nota una disminución notoria en la temperatura de los gases de escape antes y después del templador de la estufa (600-700[°C] hasta 300-400[°C]).

Se verifica una diferencia clara entre las temperaturas alcanzadas en la llama y gases de escape, así como también, en las paredes interior y exterior de la estufa de calefacción. Los mayores valores se logran en la llama, seguido por los gases de escape y las paredes internas; por su parte, las paredes exteriores registran los menores valores de temperatura en ambos ensayos (tiene sentido sabiendo de la dispersión del calor en sus diferentes formas -radiación, convección y conducción- a través de los materiales, así como las pérdidas asociadas a cada conversión de energía). De la misma forma, se nota que las gráficas de temperaturas en las llamas y en gases de escape son mucho más accidentadas que las demás (esto se explica ya que miden directamente el proceso de combustión), a diferencia de la temperatura en las paredes que, en general, poseen un comportamiento más suave de cambio a lo largo del tiempo.

### 9.3. Contaminantes Gaseosos

Los gases registrados durante el desarrollo de los ensayos corresponden a los medidos por el Testo 350. De la información suministrada, a continuación se presentarán las concentraciones y factores de emisión generados.

#### 9.3.1. Concentraciones Registradas

La figura 60 muestra las concentraciones registradas durante la realización de los ensayos de combustión para el monóxido de carbono (Figura 60a) y dióxido de carbono (Figura 60b)

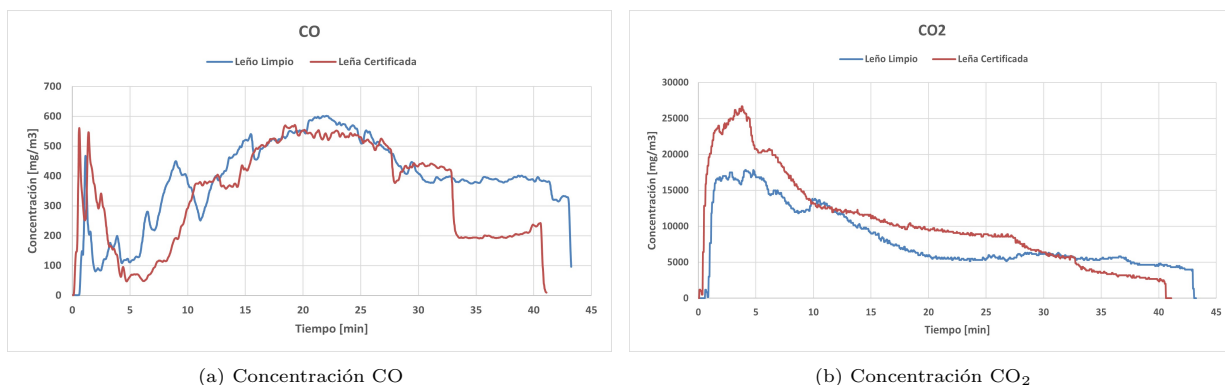


Figura 60: Concentraciones registradas de CO y CO<sub>2</sub>.

Se observa de la concentración de CO en ambos combustibles, un peak inicial cercano a 500  $[mg/m^3]$  y un máximo de emisiones aproximadamente a la mitad del ensayo (20-25 [min]). Además, se registra un mínimo de emisiones cercano a los 5 min, lo que coincide con el encendido de la madera y también con las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> detectadas. En base a las figuras mostradas, al parecer la lavada emite una cantidad levemente mayor de monóxido de carbono; por el contrario la leña certificada sin lavar muestra emisiones mayores de dióxido de carbono durante prácticamente toda la duración de los ensayos.

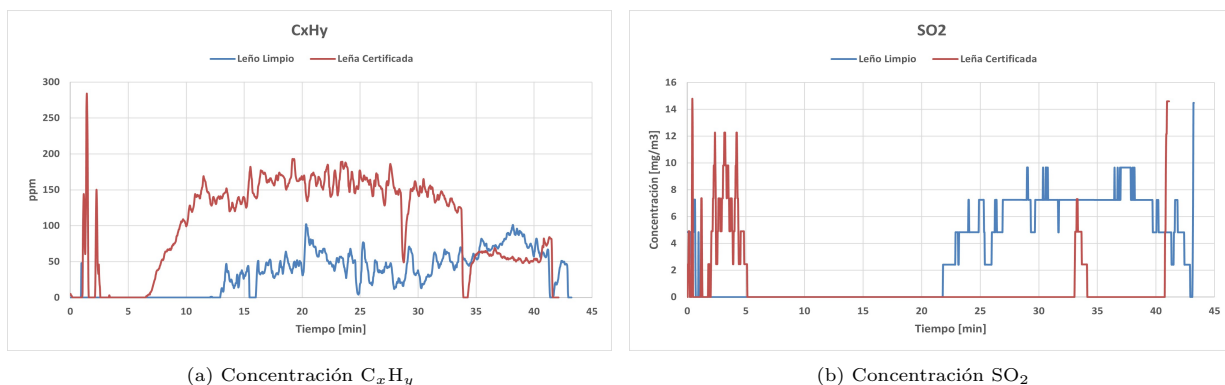


Figura 61: Concentraciones registradas de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> y SO<sub>2</sub>.

Los hidrocarburos emitidos se presentan en la figura 61a, en aquella imagen se puede observar que la mayor cantidad de moléculas de este tipo se generan con la combustión de leña sin lavar. Al comenzar el encendido de la madera (primeros 5 min), se alcanza un valor máximo de aproximadamente 270 ppm con este tipo de combustible. Posteriormente desde los 10 hasta casi los 35 minutos se emiten estos contaminantes de manera casi continua.

Por su parte, la leña lavada casi no registra emisiones de hidrocarburos durante los primeros 10-12 [min] de ensayo, posterior a este momento, se observan mediciones con valores en torno a las 50 ppm, lo que es casi un 70 % menos que las generadas por leña certificada sin lavar (valores en torno a 150 ppm) en los mismos instantes de tiempo. Este resultado es relevante, pues estos compuestos ( $C_xH_y$ ) tienden a reaccionar al momento de la combustión y generar material particulado u otras moléculas contaminantes entre los que se cuentan hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) entre otros. Es decir, el pretratamiento de lavado de leña podría mostrar cierta mitigación de contaminantes gaseosos asociado a los hidrocarburos.

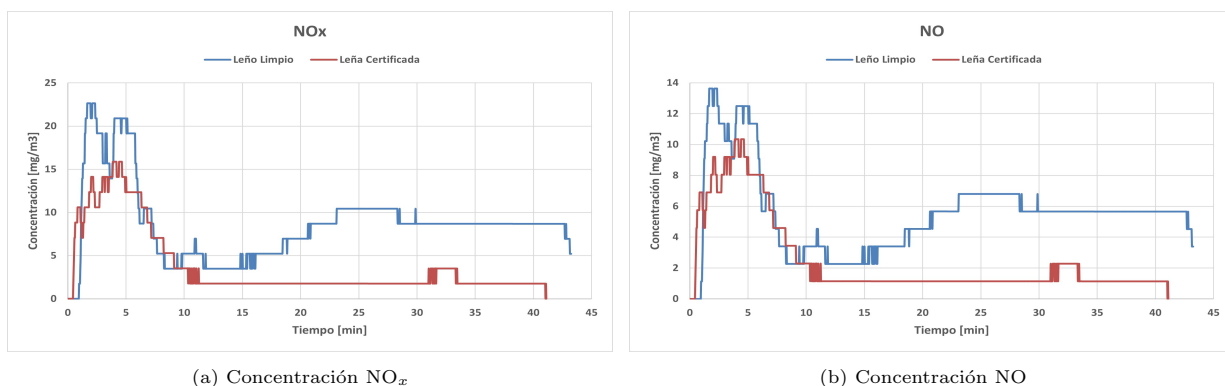


Figura 62: Concentraciones registradas de NO<sub>x</sub> y NO.

Las concentraciones registradas de gases tales como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y NO (figuras 61b, 62a y 62b respectivamente) muestran en general bajas emisiones de éstos compuestos a la atmósfera durante el proceso de combustión. A causa de que la leña se compone elementalmente de Carbono (C), Oxígeno (O) e Hidrógeno (H) en mayores proporciones (~ 98 % del total) y solo cerca de un 2 % lo representan elementos como el Nitrógeno (N), el Azufre (S), Potasio (K) o Calcio (Ca), entre otros, se vuelven esperables mayores emisiones generales de CO, CO<sub>2</sub> o C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> en comparación a los demás gases medidos.

### 9.3.2. Factor de Emisión

Las figuras 63 y 64 muestran los factores de emisión calculados en base a las concentraciones registradas a lo largo de los ensayos de combustión durante un tiempo de 38 minutos. Como se ha señalado previamente, se comprueba mediante los FE obtenidos para gases como el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NO}$  que sus valores son bastante bajos y en general, dichos compuestos no son muy estudiados en los estudios referidos a combustión de leña. Junto a ello, se puede decir que las graficas adjuntas (Fig. 61b, 62a y 62b) poseen un comportamiento extraño en los registros, lo que puede explicarse en parte por la baja presencia de dichos elementos en la leña combustionada. Es por estas mismas razones también, que estos cálculos no serán tan relevantes al momento de hacer el análisis final.

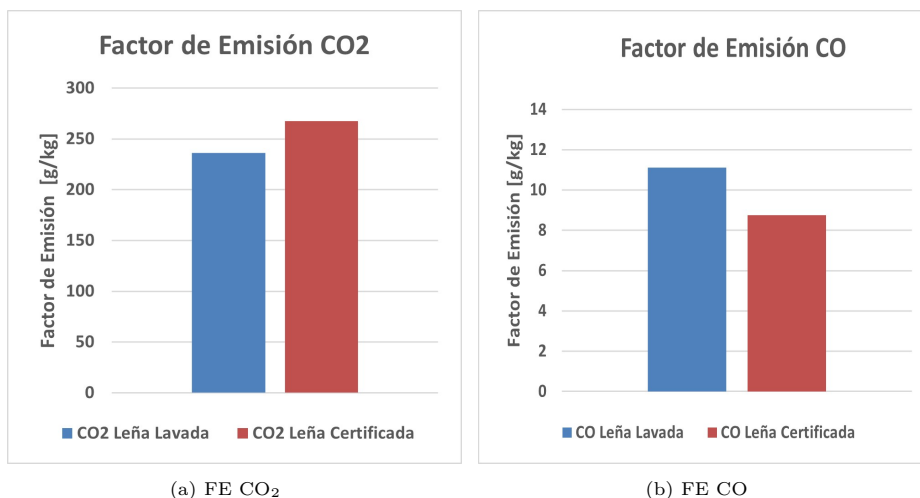


Figura 63: Factores de emisión máxicos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ .

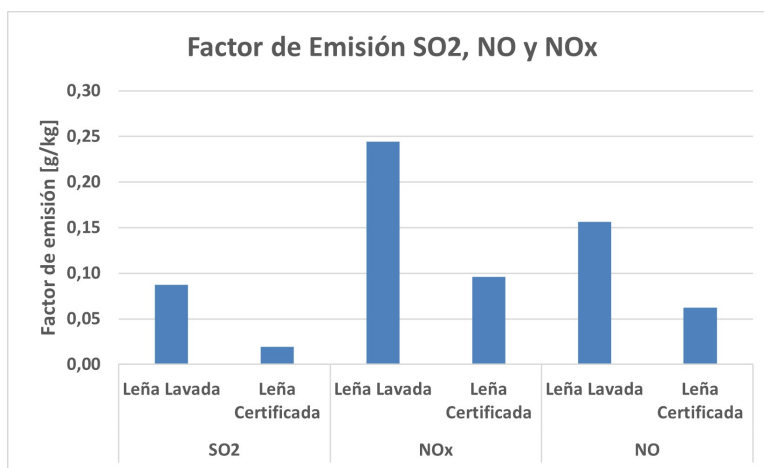


Figura 64: Factor de emisión máxico para  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_x$ .



Lo que refiere a los FE máxicos generados para el monóxido de carbono y el dióxido de carbono mostrados en las figuras 63b y 63a respectivamente, señalan una cantidad levemente mayor de  $\text{CO}_2$  emitido por la leña certificada sin lavar ( $\sim 680[\text{g}/\text{kg}]$ ) en comparación a la leña lavada ( $\sim 600[\text{g}/\text{kg}]$ ). De manera inversa, para el gas  $\text{CO}$  se comprueba que la leña certificada sin pretratamiento posee un FE menor ( $22[\text{g}/\text{kg}]$ ) frente a la leña lixiviada ( $28[\text{g}/\text{kg}]$ ).

En base a los resultados obtenidos por diversos estudios con condiciones similares de tiempo, masa, humedad, combustible, artefactos y equipos utilizados en sus ensayos de combustión es posible establecer algunas comparaciones. Primero, referido a las emisiones de monóxido de carbono se registran valores que varían desde  $63,33 - 126,88 [\text{g}/\text{kg}]$  ([37] [39] [40] [41]) lo que no es tan distante, pero sí superior a lo obtenido en los presentes ensayos. Similar ocurre con los FE de  $\text{CO}_2$  calculados, ya que estos son menores también a los informados por otros investigadores [40] [41] ( $1548 \pm 259$  y  $808 \pm 405 [\text{g}/\text{kg}]$  respectivamente). Dicha información, a pesar de ser diferente y encontrarse un tanto alejado de los rangos reportados, sí se encuentra dentro de los ordenes de magnitud esperados.

Las discrepancias presentadas entre los datos calculados y los informados por otros investigadores, se pueden explicar por la variabilidad de composición elemental y orgánica entre especies de árboles e incluso entre individuos de una misma especie particular. Esto ocurre, ya que al trabajar con organismos vivos, el terreno sobre el cual crecen e incluso el agua consumida, posee relevancia al contener los nutrientes consumidos a lo largo de su vida.

Con respecto a las emisiones de hidrocarburos totales, algunos estudios informan FE al expresarlos en forma metano ( $\text{CH}_4$ ), esto se realiza pues éste es el hidrocarburo más ligero y por lo tanto, el factor de emisión obtenido corresponderá al menor posible y sirve de referencia. Al aplicar dicha conversión a los datos registrados durante los presentes ensayos se obtiene un FE de  $4,86 [\text{g}/\text{kg}]$  para la leña lavada y  $18,15[\text{g}/\text{kg}]$  en la leña certificada sin lavar. Dichos valores son bastante similares a los  $3,43 \pm 1,17$  [37],  $9,08 \pm 1,71$  [39] y  $5,2 \pm 4,0$  [40] informados por otros investigadores.

## Parte IV

# Análisis de resultados y Recomendaciones

A causa de la baja cantidad de réplicas logradas, en los diferentes ensayos llevados a cabo durante el desarrollo de este trabajo de título, se hace complejo obtener conclusiones precisas. Por este motivo se presenta a continuación, un análisis de resultados que ayude a plantear algunas hipótesis para nuevos y posteriores ensayos o trabajos de tesis.

## 10. Análisis de resultados

- En base a la información recopilada, se observa un aumento sostenido durante los últimos años, del consumo de leña para calefaccionar a nivel nacional. El origen de esa madera utilizada, continúa siendo mayoritariamente de tipo nativo, a pesar de que la brecha con la madera exótica ha ido disminuyendo a lo largo del tiempo.
- Los estudios de caracterización del consumo de leña en Chile muestran una predominancia del **Roble Hualle** (*Nothofagus obliqua*) y **Eucalipto** (*Eucalyptus globulus*) sobre las demás especies en gran parte del territorio nacional. Además de considerar estos tipos de árboles para más estudios de pretratamiento de lavado de leña, la **Lenga** (*Nothofagus pumilio*) también es una especie de interés, ya que pertenece a la misma familia del roble hualle (se le conoce como roble de tierra del fuego); junto a ello es bastante consumida y muy característica en el sur de Chile, en particular en la región de Aysén.
- Existe un protocolo de pretratamiento de lavado de leña desarrollado que posee parámetros definidos entre los que considera la utilización de leños con corteza, una humedad interna en base seca  $< 25\%$  y una masa que varía entre  $\sim 1 - 2[kg]$ . El fluido ocupado es agua destilada a temperatura ambiente ( $\sim 15 - 25 [^{\circ}C]$ ) y la relación entre masa de sólido y líquido (S:L) es 1 : 4. Junto a esto, también se ha establecido que, con las condiciones señaladas, para el caso de un sólo ciclo de lavado se logra una estabilización en la extracción de compuestos químicos hidrófilos después de transcurrido 7 semanas. Por su parte, al realizar más ciclos de lavado (de una semana cada uno) se nota una disminución en el tiempo requerido para alcanzar un equilibrio en el traspaso de compuestos desde la madera al agua (4 semanas). Con respecto al pH registrado en ambos ensayos se nota una estabilización en torno a los 4-5 [-] durante las primeras horas, lo que indica que el extracto resultante tiene características de acidez, a pesar de estar dentro de valores que pudieran considerarse neutros.
- Entre los factores que pudieran afectar los resultados obtenidos en los ensayos referidos al protocolo de lavado de leña, hay que considerar aquellos asociados a los equipos utilizados (medidor de calidad del agua (pH y conductividad), xilohigrómetro y balanzas). La humedad registrada puede contener, además del error ya indicado, otro asociado al hecho de que dicha medición se realiza en las capas más externas de la madera, por lo que se desconoce que ocurre con el contenido de agua en las fibras más internas. Por otro lado, la diferencia de tamaño y masa entre la leña del ensayo extendido y por ciclos pudiera afectar el tiempo final de cada ensayo llevado a cabo y también, la cantidad de compuestos orgánicos posibles de obtener. Esto ya que, según la bibliografía consultada, tanto el tiempo como el tamaño y la masa son factores importantes en el procedimiento y resultados finales del proceso de extracción. Finalmente, los errores humanos presentes en los diferentes procedimientos no deben olvidarse, ya que siempre pueden existir.



- Para los ensayos de combustión llevados a cabo, se nota una tasa de quemado bastante similar a los resultados entregados por otros investigadores. Las temperaturas registradas muestran mayores valores alcanzados por la leña sin lavar prácticamente en todas las termocuplas, lo que podría hacer suponer una mayor energía suministrada en forma de radiación por este combustible, sin embargo, son necesarios estudios energéticos específicos para poder determinarlo. Esto ya que se visualiza una diferencia más abultada entre los valores alcanzados por la llama (termocuplas 7 y 8) con los gases de escape (termocupla 9) en la madera lavada, lo que también hace pensar una mayor energía entregada en forma de calor por este combustible al momento de pasar por el templador.
- Para el intervalo de tiempo estudiado de combustión, se obtuvieron factores de emisión bastante similares entre los dos tipos de leña, sin embargo, se presentan algunas diferencias. En el caso del monóxido de carbono se generó en mayor cantidad con el combustible lavado. De manera inversa, el FE del dióxido de carbono muestra una predominancia por parte de la leña certificada sin lavar. Con respecto a los gases  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NO}$ , en general, son elementos que se presentan en muy bajas concentraciones en la madera, por lo que sus FE calculados tienen relación con ello al mostrar una baja cantidad de dichos contaminantes. Finalmente, los hidrocarburos registrados muestran una mayor proporción de contaminantes originados en la quema de combustible sin lavar, esto último, plantea la posibilidad de que la madera con pretratamiento genere menor cantidad de material particulado al medioambiente, ya que estos mismos compuestos reaccionan al momento de la combustión formando contaminantes más tóxicos (una mayor cantidad de  $\text{C}_x\text{H}_y$  o de  $\text{CO}$  producido, implica menos carbono disponible para generar  $\text{CO}_2$  y también, una combustión menos eficiente).
- En base a los FE obtenidos para los diferentes gases medidos en este estudio, no se refleja una mitigación de contaminantes atmosféricos por parte de la leña con pretratamiento de lavado, sin embargo, el que exista un registro menor de hidrocarburos liberados al ambiente al quemar este combustible, hace pensar (por las características de dicho contaminante), que quizás la mitigación se vea reflejada en la cantidad de material particulado emitido y por lo mismo, es necesario realizar estudios enfocados a medir el MP producido.
- En relación a aspectos que puedan afectar los resultados obtenidos en los ensayos de combustión desarrollados, se deben considerar aquellos propios de los equipos e instrumentos utilizados (informados por fabricantes). Además, hay que recordar lo referido a la medición de humedad en la madera mencionado previamente; esto puede traer como consecuencia una combustión de menor calidad y por lo tanto, emisiones contaminantes alteradas. Por otro lado, la combustión irregular de la leña (característico de la biomasa), sumado a la poca cantidad de reproducciones realizada a cada ensayo, también afecta las mediciones registradas. Finalmente, en el caso del registro de masa y la tasa de quemado, un detalle importantes es el hecho de que la estufa con el conjunto del túnel de dilución (caños de gases de escape) están montados sobre la balanza durante los ensayos de combustión; producto de esto, la dilatación de los caños a causa de la temperatura de los gases, así como el aire que ingresa y reacciona en la estufa pueden generar fuerzas sobre el instrumento que hagan variar los datos conseguidos.



## 11. Recomendaciones

En base a lo señalado previamente, en las conclusiones de este trabajo, a continuación se expresan algunas recomendaciones para realizar en trabajos futuros.

- Continuar con la investigación relacionada al lavado de leña, logrando mayor cantidad de réplicas que permitan definir de manera más adecuada el tiempo requerido para lograr un tratamiento con alto porcentaje de compuestos extraídos.
- Estudiar el resultado del pretratamiento de lavado de leña ocupando proporciones S:L menores, con la finalidad de conocer el punto de equilibrio en que se utiliza la menor cantidad de agua posible y se consigue la mejor extracción. Del mismo modo, ver que ocurre al utilizar agua de llave.
- Revalorizar el extracto resultante del pretratamiento de lavado de leña, buscando .
- Desarrollar nuevos ensayos (idealmente 3 o más) enfocados al estudio tanto de material particulado como de gases contaminantes, para tener resultados con menores errores experimentales y poder de esta manera, llegar a conclusiones que permitan aclarar los reales beneficios del pretratamiento de lavado de leña.

## Referencias

- [1] N. Huneus, A. Urquiza, E. Gayó, M. Osses, R. Arriagada, M. Valdés, N. Álamos, C. Amigo, D. Arrieta, K. Basoa, M. Billi, G. Blanco, J. P. Boisier, R. Calvo, I. Casielles, M. Castro, J. Chahuán, D. Christie, L. Cordero, V. Correa, J. Cortés, Z. Fleming, N. Gajardo, L. Gallardo, L. Gómez, X. Insunza, P. Iriarte, J. Labraña, F. Lambert, A. Muñoz, M. Opazo, R. O’Ryan, A. Osses, M. Plass, M. Rivas, S. Salinas, S. Santander, R. Seguel, P. Smith, and S. Tolvett, “El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – contaminación atmosférica por  $mp_{2,5}$  en el centro y sur de Chile.” *Informe a las Naciones*, 2020. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009), 102 pp. [www.cr2.cl/contaminacion/](http://www.cr2.cl/contaminacion/).
- [2] H. Lizama, N. Figueroa, F. Hani, R. Bórquez, M. Sánchez, H. Rojas, M. J. Herrera, Álvaro Shee, J. Gonzalez, E. Balcarce, and M. Corral., “Calidad del aire,” in *Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente*, pp. 103–131, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile., 2018.
- [3] A. Schueftan, J. Sommerhoff, and A. González., “Demanda de leña y políticas de energía en el centro-sur de Chile.” *Boletín BES, Bosques - Energía - Sociedad*. N° 5, Año 2., Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM, Instituto Forestal, Chile. p.20., Junio 2016.
- [4] IQAir, “World air quality report 2020,” Tech. Rep. N° 6., IQAir, 2020.
- [5] F. Paz., “Determinación de la composición química de la madera obtenida del primer clareo en árboles de melina, de una plantación proveniente del departamento de Izabal,” tesis de grado ingeniería química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Octubre 2008.
- [6] F. Cereceda-Balic, M. Toledo, V. Vidal, F. Guerrero, L. Diaz-Robles, X. Petit-Breuilh, and M. La-puerta., “Emission factors for  $pm_{2,5}$ , CO,  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  and particle size distributions from the combustion of wood species using a new controlled combustion chamber 3ce.” Elsevier, February 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717301432?via%3Dihub>.
- [7] L. Diaz-Robles, X. Petit-Breuilh, S. Dávila, C. Varela-Bruce, and C. Lagos., “Proceedings of the air and waste management association’s annual conference and exhibition,awma.” in *Physic-chemical characterization of the 11 most used trees in Chile for residential wood combustion.*, vol. 2, (Chicago, US), June 2013.
- [8] Wikipedia®, “Hemicelulosa.” <https://es.wikipedia.org/wiki/Hemicelulosa>, Abril 2021. Accedido en Septiembre de 2021.
- [9] H. Mansilla, R. García, J. Tapia, H. Durán, and S. Urzúa., “Chemical characterization of Chilean hardwoods.” *Wood Science and Technology*, September 1991.
- [10] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, vol. 1 of ISBN 978-607-15-0743-3. Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe, Delegación Álvaro Obregón, C.P. 01376, México, D.F.: Pablo E. Roig Vázquez y Ana Laura Delgado Rodríguez, séptima ed., 2011.
- [11] I. Forestal, “Anuario forestal 2019,” Boletín estadístico. 168, Instituto forestal y Min. de Agricultura de Chile, Santiago, Chile, Septiembre 2019.
- [12] N. Álamos, C. Amigo, R. Calvo, J. Chahuán, V. Correa, J. Cortés, J. Labraña, and A. Urquiza., “Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética.” *Informe Medición Consumo Nacional de Leña*. 7, Red de Pobreza Energética., Septiembre 2020. [www.pobrezaenergetica.cl](http://www.pobrezaenergetica.cl).
- [13] A. Gómez-Lobos, J. L. Lima, C. Hill, and M. Meneses., “Diagnóstico del mercado de la leña en Chile.” informe técnico, Centro de Micro Datos, Santiago, Chile., 2006. Preparado para la Comisión Nacional de Energía (CNE).



- [14] R. Reyes and E. Neira., “Leña, energía renovable para la conservación de los bosques nativos de Chile,” informe técnico, Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo., Valdivia, Chile., 2012.
- [15] C. de Desarrollo Tecnológico, “Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera.,” informe final, Corporación de Desarrollo Tecnológico y Ministerio de Energía., Santiago, Chile., Diciembre 2015.
- [16] M. del Medioambiente, *Establece norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustión o puedan combustión leña y pellet de madera.* Ministerio del Medioambiente, Marzo 2011.
- [17] P. Silva, “Evaluación técnica del uso de esponjas cerámicas en proceso de combustión de leña en estufa comercial de calefacción residencial,” tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Avda. España 1680, Valparaíso, Junio 2016.
- [18] S. Geoambiental®, “Material particulado.” <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>, Diciembre 2013. Accedido en junio de 2021.
- [19] M. S. G. de la Presidencia and C. N. del Medio Ambiente (CONAMA)., “Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable mp<sub>10</sub> en especial de los valores que definen situaciones de emergencia.,” Decreto Supremo 59, CONAMA, Marzo 1998. <https://www.leychile.cl/N?i=99434f=2015-10-17p=>.
- [20] M. del Medio Ambiente., “Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable mp<sub>2,5</sub>,” Decreto Supremo 12, MMA, Enero 2012. <https://www.leychile.cl/N?i=1025202f=2012-01-01p=>.
- [21] A. de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA), “Research on health effects from air pollution.” <https://www.epa.gov/air-research/research-health-effects-air-pollution>, Julio 2021. Accedido en julio de 2021.
- [22] Y. Çengel, “Transferencia de masa,” in *Transferencia de Calor y Masa* (R. del Bosque Alayón, ed.), vol. 1, energía 14, pp. 773–819, México, D.F: McGraw Hill, 3 ed., 2007.
- [23] R. Treybal, “Las operaciones de transferencia de masa,” in *Operaciones de Transferencia de Masa* (A. García, ed.), vol. I, ch. I, pp. 01–13, Rhode Island, EE.UU: McGraw-Hill, 2° ed., Enero 1997.
- [24] M. Castelló, P. Fito, L. Seguí, and N. Betoret, “Fundamentos de la extracción sólido-líquido,” apunte, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2020. Departamento de Tecnología de Alimentos.
- [25] L. Deng, T. Zhang, and D. Che, “Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass.,” *Fuel Processing Technology*, vol. 106, pp. 712–720, November 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.10.006>.
- [26] P. Ravichandran and K. Corscadden, “Comparison of gaseous and particle emissions produced from leached and un-leached agricultural biomass briquettes.,” *Fuel Processing Technology*, vol. 128, pp. 359–366, July 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.030>.
- [27] G. Schmidt, G. Trouvé, G. Leyssens, C. Schönnenbeck, P. Genevray, F. Cazier, D. Dewaele, C. Vandebilcke, E. Faivre, Y. Denance, and C. L. Dreff-Lorimier., “Wood washing: Influence on gaseous and particulate emissions during wood combustion in a domestic pellet stove,” *Fuel Processing Technology*, pp. 104–117, February 2018.
- [28] G. Schmidt, G. Trouvé, G. Leyssens, C. Schönnenbeck, A. Brillard, M. E. Oyla, D. Dewaele, and F. Cazier, “Influence and modelling of wood washing on mineral and organic compositions of three woods (beech, fir and oak),” *Journal of Energy Institute*, April 2019. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.03.008>.



- [29] A. Singhal, J. Konttinen, and T. Joronen, “Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. part 1: Effect of washing duration and biomass size,” *Fuel*, vol. 292, January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120206>.
- [30] A. Singhal, J. Konttinen, and T. Joronen, “Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. part 2: Effect of washing temperature and solid-to-liquid ratio,” *Fuel*, vol. 292, January 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120209>.
- [31] Y. W. Bandara, P. Gamage, and D. S. Gunarathne., “Hot water washing of rice husk for ash removal: The effect of washing temperature, washing time, and particle size,” *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 646–652, February 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.038>.
- [32] K. Cen, Z. M. Jie Zhang, D. Chen, J. Zhou, and H. Ma, “Investigation of the relevance between biomass pyrolysis polygeneration and washing pretreatment under different severities: Water, dilute acid solution and aqueous phase bio-oil,” *Bioresource Technology*, vol. 278, pp. 26–33, January 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.048>.
- [33] Q. Orgánica, “Extracción,” apunte curso química orgánica, Universidad Nacional La Plata, La Plata, Argentina, Marzo 2020. Departamento de Ingeniería Química.
- [34] T. 350, “Analizador de gases testo 350.” <https://www.testo.com/es-CL/testo-350/p/0632-3510>, Enero 2022. Accedido en Enero 2022.
- [35] F. Muñoz, “Análisis de emisión de material particulado en el proceso de combustión de leña en estufa de calefacción residencial con el uso de esponjas cerámicas,” tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Avda. España 1680, Valparaíso, Octubre 2019.
- [36] R. Bernabé-Santiago, L. Ávila Calderón, and J. Rutiaga-Quñones, “Chemical components of the wood of five pine species of morelia, michoacán,” *Madera y bosques*, vol. 19, June 2013. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712013000200002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000200002).
- [37] J. Jimenez, O. Farías, R. Quiroz, and J. Yañez, “Emission factors of particulate matter, polycyclic aromatic hydrocarbons and levoglucosan from wood combustion in south-central chile,” *Journal of the air waste management association*, vol. 67, February 2017. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1295114>.
- [38] F. Guerrero, A. Arriagada, F. Muñoz, P. Silva, N. Ripoll, and M. Toledo, “Particulate matter emissions reduction from residential wood stove using inert porous material inside its combustion chamber,” *Fuel*, November 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119756>.
- [39] A. Calvo, L. Tarelho, C. Alves, M. Duarte, and T. Nunes, “Characterization of operating conditions of two residential wood combustion appliances,” *Fuel Processing Technology*, vol. 126, May 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.05.001>.
- [40] C. GonA. Fernandes, C. alves, C. Gon

## Parte V

# Anexo

La información contenida en los anexos, que consta principalmente de las planillas con los datos obtenidos de los diversos ensayos realizados, se adjunta en formato de archivos para su mejor visualización y respaldo.