

TRABAJO FINAL INTEGRADOR



Estudio del potencial impacto en la
atmósfera por el uso masivo de pellets de
Pinus ponderosa para calefacción doméstica
en San Carlos de Bariloche

Guillermo Douat

Ingeniería Ambiental

2020

Firma y aclaración
Alumno

Firma y aclaración
Director

Firma y aclaración
Co-Director

0. Información general

Título: Estudio del potencial impacto en la atmósfera por el uso masivo de pellets de *Pinus ponderosa* para calefacción doméstica en San Carlos de Bariloche

Alumno: Guillermo Douat

Carrera: Ingeniería Ambiental

Director: Fernando Salvare

Co-Director: Marcelo Alejandro Caputo

Lugar de trabajo: CIEFAP Delegación Bariloche y Centro Atómico Bariloche

Agradecimientos

A mis directores por brindarme el marco de trabajo.

A Leonardo Andreassi por acompañarme durante el desarrollo del mismo.

Al personal del Servicio Forestal Andino por acojermme en sus instalaciones.

A Héctor Bajano por brindarme su instrumental para llevar a cabo los muestreos.

A mi familia y amigos.

0. Información general.....	1
0.1. Índice de tablas.....	6
0.2. Índice de figuras.....	8
1. Resumen.....	11
2. Introducción.....	13
2.1. Políticas para la promoción de las energías renovables.....	15
2.2. Matriz y seguridad energética.....	15
2.3. Panorama nacional y local.....	16
2.4. Energías alternativas.....	17
2.4.1. Bioenergía.....	18
2.5. Utilización de los residuos forestales de la región.....	19
2.5.1. Características del residuo forestal.....	21
2.5.2. De residuo forestal a pellet y chip.....	22
2.6. Impacto sobre la calidad de aire por el uso de la biomasa.....	23
3. Antecedentes y Justificación.....	24
3.1. Uso de la biomasa en Europa y Argentina.....	24
3.2. Plan calor.....	25
4. Objetivo.....	27
4.1. Objetivos específicos.....	27
5. Alcance.....	27
6. Hipótesis.....	28
7. Metodología y resultados.....	29

7.1. Recolección de los subproductos del manejo forestal.....	30
7.2. Chipeado.....	33
7.3. Acondicionamiento y caracterización de la materia prima.....	35
7.3.1. Chips.....	35
7.3.2 Pellet.....	38
7.4. Pelletización.....	40
7.5. Caracterización de los biocombustibles.....	43
7.6. Caracterización pellets.....	47
7.7. Caracterización astillas.....	50
7.8. Ensayos de combustión y medición de las emisiones.....	51
7.9. Error en el muestreo.....	59
7.10. Resultados del análisis de las emisiones y la combustión.....	60
7.10.1. Pellets (estufa Mocca de origen chino).....	60
7.10.2. Chips (caldera Hargassner de origen austríaco).....	62
7.11. Límites de emisión según normativa.....	64
8. Análisis de los resultados.....	67
8.1. Caracterización de los biocombustibles.....	67
8.2. Análisis de las emisiones y la combustión.....	68
8.2.1. Pellets (estufa Mocca de origen chino).....	68
8.2.2. Chips (caldera Hargassner de origen austríaco).....	72
8.2.3. Comparación con legislación argentina.....	75
9. Conclusiones.....	77

9.1. Observaciones finales.....	77
9.2. Conclusiones del trabajo.....	77
10. Trabajos futuros.....	82
11. Referencias.....	83
12. Anexo.....	88
12.1. Mediciones de la velocidad de flujo en estufa y caldera.....	88
12.2. Calibración de la balanza analítica.....	89
12.3. Comparación entre métodos para la medición de la velocidad del flujo.....	90
12.4. Certificado de calibración Testo 310.....	91
12.5. Propagación de errores.....	92

0.1. Índice de tablas

Tabla 1 : Comparación de valores de la unidad energética. Marzo 2020.....	21
Tabla 2 : Humedad de las ramas con acículas de Ea La Veranada.....	33
Tabla 3 : Humedad de residuos forestales recientemente chipeados mediante método ISO 18134-2.....	36
Tabla 4 : Densidad aparente de chips y astillas.....	37
Tabla 5 : Humectación de las materias primas para pelletización.....	39
Tabla 6 : Parámetros de pelletización.....	42
Tabla 7 : Etiquetas de calidad para pellets establecidas por ISO 17225-2.....	45
Tabla 8 : Etiquetas de calidad para astillas establecidas por ISO 17225-4.....	46
Tabla 9 : Ensayos de caracterización energética para biocombustibles en formato pellet.....	47
Tabla 10 : Ensayos de caracterización energética para biocombustibles en formato astilla.....	50
Tabla 11 : Emisiones de MPT y CO de estufa a pellets Mocca.....	60
Tabla 12 : Potencia útil de estufa Mocca en base a los diferentes combustibles	61
Tabla 13 : Emisión de caudal másico de estufa Mocca para comparación con normativa.....	61
Tabla 14 : Emisiones de MPT y CO de caldera Hargassner.....	63
Tabla 15 : Potencia útil de caldera Hargassner en base a los diferentes combustibles.....	63
Tabla 16 : Límite de emisión para estufas a pellets y/o leña según Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile - Año 2014.....	64

Tabla 17 : Límites de emisión y requisitos de eficiencia para estufas a pellet según Reglamento 2015/1185 de la Unión Europea - Año 2015.....	64
Tabla 18 : Límites de emisión y requisitos de eficiencia para calderas según Reglamento 2015/1189 de la Unión Europea - Año 2015.....	65
Tabla 19 : Límites de emisión de calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW según la norma europea UNE EN 303-5 - Año 2012.....	65
Tabla 20 : Límites de emisión de MPT para centrales turbovapor según combustible. Resolución 0108/2001 de la Secretaria de Energía y Minería de Argentina.....	66
Tabla 21 : Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes.....	68
Tabla 22 : Comparación entre límites de emisión de MP con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes. Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile.....	70
Tabla 23 : Comparación entre límites de emisión de MP con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes. Normativa europea.....	71
Tabla 24 : Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para chips y sus errores correspondientes.....	72
Tabla 25 : Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para chips y sus errores correspondientes.....	73
Tabla 26 : Comparación entre límites de emisión de MPT para centrales termoeléctricas con valores obtenidos y sus errores correspondientes. Corrección al 3% de O ₂	75

Tabla 27 : Comparación entre límites de emisión de MPT para centrales termoeléctricas con valores obtenidos y sus errores correspondientes. Corrección al 6% de O2.....	76
---	----

0.2. Índice de figuras

Figura 1 : Niveles modelados de PM 2.5 en América. Fuente: Plataforma Global de contaminación atmosférica de la OMS.....	14
Figura 2 : Matriz energética Argentina. Abril 2019. Fuente: CAMMESA, 2019.	16
Figura 3 : Balance de emisiones.....	18
Figura 4 : Evolución de la superficie forestada en ha.año-1 (eje y)de Neuquén, Río Negro y Chubut. Fuente: Inventario Nacional de Plantaciones Forestales. 2017.....	20
Figura 5 : Diagrama de trabajo.....	29
Figura 6 : Plantación y residuos forestales de estancia La Veranada (-41.233146, -71.187688).....	30
Figura 7 : Residuos forestales de estancia La Veranada.....	31
Figura 8 : Residuos forestales SFA (-41.127070, -71.424146) ..	32
Figura 9 : Biomasa de fuste para producción de pellets (izquierda) y chips de fuste (derecha).....	32
Figura 10 : Chipeado de residuos forestales.....	34
Figura 11 : Ramas y despuntes (izquierda) y ramas con acículas -follaje- (derecha).....	34
Figura 12 : Chips de fuste (izquierda), Chips de follaje(medio), y chips de ramas (derecha).....	35

Figura 13 : Humedad mediante método ISO para material de fuste molido (arriba), chips de ramas (medio), y chips de follaje (abajo)	36
Figura 14 : Secado de chips obtenidos a partir de ramas de <i>Pinus ponderosa</i>	37
Figura 15 : Densidad aparente de chips de fuste (izquierda), chips de ramas (medio) y chips de follaje (derecha).....	38
Figura 16 : Molienda del material	39
Figura 17 : Diagrama del proceso de humidificación.....	40
Figura 18 : Astillas de ramas de <i>Pinus ponderosa</i> (izquierda) y el producto de su molienda (derecha).....	41
Figura 19 : Materia prima y pellets: Ramas (izquierda), follaje (medio) y fuste (derecha).....	41
Figura 20 : Determinación de cenizas para pellets fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha).....	48
Figura 21 : Determinación de densidad aparente de pellets de fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha).....	48
Figura 22 : Análisis dimensional de pellets <i>Pinus ponderosa</i>	49
Figura 23 : Cenizas de pellets de fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha).....	49
Figura 24 : Caldera Hargassner 50 kW (izquierda) y estufa a pellet Mocca 9 kW (derecha).....	51
Figura 25 : Muestreo Hiper-isocinético (izquierda), muestreo Sub-isocinético (medio) y muestreo isocinético (derecha). Fuente: Bajano (2006).....	53
Figura 26 : Determinación del puerto de muestreo (izquierda) y desarrollo del perfil de velocidades en una chimenea (derecha). Fuente: Bajano (2006)	54

Figura 27 : Diagrama del tren de muestreo para el método USEPA 4. Fuente: Bajano (2006).....	55
Figura 28 : Set de medición en caldera a biomasa: (1) Tubo Pitot, (2) Portafiltro en puerto de muestreo, (3) Línea de inoxidable donde se produce la condensación, (4) Sistema condensador y (5) Cordón umbilical o línea de muestreo.....	57
Figura 29 : Analizador de gases de combustión Testo 310.....	58
Figura 30 : Muestreador isocinético de gases (izquierda) y consola de medición (derecha).....	58
Figura 31 : Filtro usado con sellado incorrecto (izquierda) y sellado correcto (derecha).....	62
Figura 32 : Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de monóxido de carbono de pellets.....	69
Figura 33 : Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de pellets. Normativa chilena.....	70
Figura 34 : Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de pellets. Normativa europea.....	71
Figura 35 : Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de monóxido de carbono de chips.....	73
Figura 36 : Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de chips. Normativa Europea.....	74
Figura 37 : Potencia útil en la caldera para cada corriente de residuos forestales.....	75
Figura 38 : Curva de calibración de balanzas analíticas.....	89

1. Resumen

Para la OMS¹ el principal riesgo ambiental para la salud de la población latinoamericana es la contaminación atmosférica, pasivo que genera una de cada nueve muertes a nivel mundial (Prüss-Ustün et. al., 2016). Dicho organismo fundamenta que la polución del aire es producto del desarrollo humano a raíz de la combustión ineficiente de los combustibles fósiles y la biomasa. En consecuencia, diversos actores han incentivado el desarrollo de energías renovables eficientes y limpias con el objetivo de revertir esta situación.

En San Carlos de Bariloche la ausencia de gas natural por red en una parte de la población, es un problema que persiste a lo largo de los años. Asimismo, dicha ciudad se caracteriza por poseer grandes extensiones de bosques nativos y plantaciones con especies exóticas, de las cuales se podrían extraer grandes cantidades de biomasa. Sin embargo, para implementar la bioenergía como parte de la solución a esta problemática previamente, se debe realizar un trabajo que analice los posibles impactos que esta pueda generar en el ambiente.

Este trabajo estudió la potencialidad de uso de *Pinus ponderosa* como recurso bioenergético, en formato de pellets y chips en equipos de alta eficiencia, con el objetivo de brindar una solución a las problemáticas enunciadas anteriormente. Esto se realizó mediante el análisis de las características físico-químicas del biocombustible, las propiedades de su combustión y las emisiones generadas. Para este último punto se realizaron las mediciones de monóxido de carbono y material particulado total.

Con los resultados obtenidos, se observó que en general las corrientes analizadas no superaron los límites de emisión expuestos por diversos organismos (legislación de la Unión Europea -UE- y Chile). Sin embargo, algunos formatos de estos biocombustible no lograron superar los requisitos establecidos por las

¹Organización Mundial de la Salud

normativas de calidad para combustibles comerciales (IRAM-ISO). En consecuencia, es posible planificar el uso de los residuos forestales provenientes de la poda urbana y del manejo silvicultural, con su correspondiente transformación al formato necesario, en equipos de alta eficiencia para brindar energía térmica a la ciudad de Bariloche sin presentar grandes impactos sobre la atmósfera.

2. Introducción

Según un informe realizado en el año 2016 por la OMS², el principal riesgo ambiental para la salud de la población de América Latina es la contaminación atmosférica, pasivo que genera una de cada nueve muertes a nivel mundial (Prüss-Ustün et. al., 2016). En la figura 1, se puede observar un modelaje de las concentraciones desarrolladas en el continente americano para material particulado (MP), uno de los contaminantes que más daño causa en la salud.

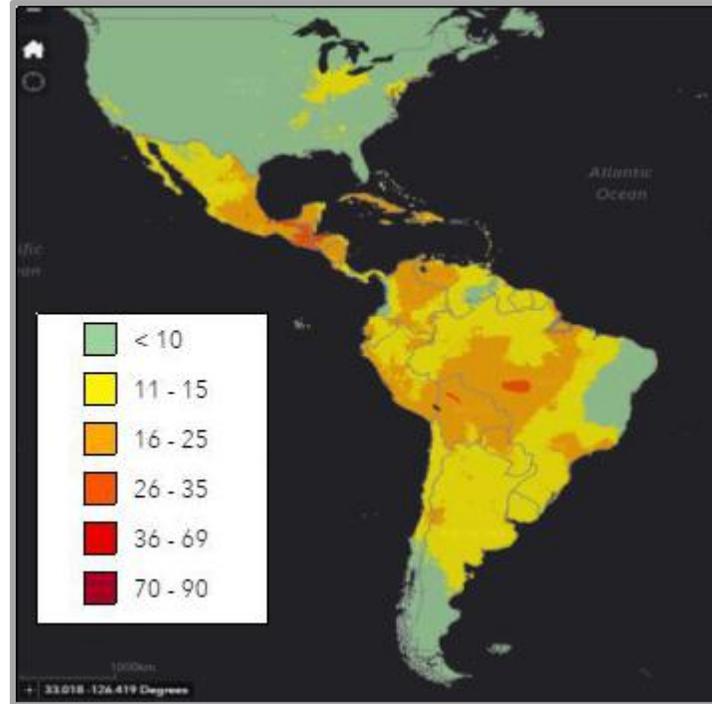
La OMS considera que una gran parte de la *“contaminación del aire es ocasionada por el desarrollo humano relacionada con la combustión ineficiente de combustibles fósiles o de biomasa; por ejemplo, los gases de escape de los automóviles, los hornos o las estufas a leña”* (OMS, 2011).

Los efectos más importantes sobre la salud se dan en aquellos casos donde la exposición es a largo plazo y de larga duración. Sin embargo, existen efectos de gran envergadura tanto a largo como a corto plazo. Generalmente, las muertes asociadas a la calidad de aire están vinculadas a enfermedades no transmisibles. Así es que *“el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad obstructiva crónica (COPD), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas son atribuibles la contaminación atmosférica”* (OPS³, 2017).

²OMS. 2016. Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks

³Organización Panamericana de la Salud

Figura 1: Niveles modelados de PM 2.5 en América. Fuente: Plataforma Global de contaminación atmosférica de la OMS.



Por ello, la disminución de las emisiones en las urbes disminuiría sus efectos sobre la salud pública. Además, el aumento en el control y monitoreo de la calidad de aire permitiría desarrollar acciones para promover una mejora en el medio. Por este motivo, es necesario que las políticas públicas promocionen y desarrollen energías eficientes y limpias para disminuir la carga de contaminantes sobre la atmósfera. Al mismo tiempo deberían establecer límites de emisión sobre aquellas fuentes que más impacto generan. Como consecuencia de la implementación de estas acciones se contribuiría con la reducción de la concentración de GEI⁴, factor clave en la lucha contra el cambio climático.

⁴Gases de Efecto Invernadero

2.1. Políticas para la promoción de las energías renovables

Actualmente en Argentina rige la Ley 27.191, la cual fomenta el uso de fuentes renovables destinadas a la producción de energía eléctrica con el objetivo de alcanzar un aporte del 20% del consumo energético nacional para el año del 2025.

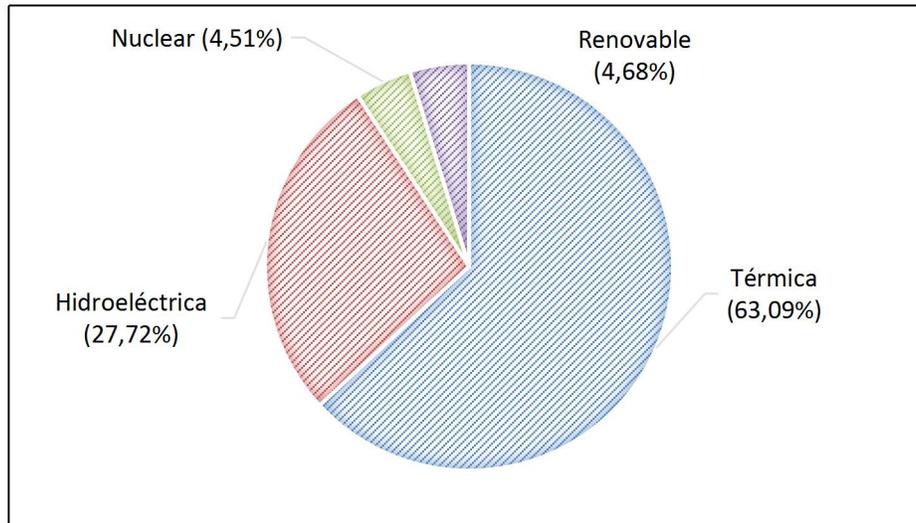
En Europa, la resolución del 14 de marzo de 2019 del parlamento europeo sobre cambio climático, pregona por un sistema energético altamente eficiente y basado en las energías renovables con el fin de *“reducir las emisiones de GEI en un 80% de aquí a 2050 en comparación con los niveles de 1990”*. Esto mismo afirma en su resolución del 14 de febrero de 2007, donde asegura que la política energética es un elemento de vital importancia en la estrategia global de la Unión Europea (UE) sobre cambio climático. En ella establece que tanto las fuentes de energía renovables, así como también las tecnologías que mejoran la eficiencia energética son piezas fundamentales en la solución a esta problemática (Cerdá et. al., 2008).

En este mismo contexto, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), sugiere a las ciudades desarrollar medidas que favorezcan la resiliencia urbana: *“diversificar las fuentes de energía, aumentar la flexibilidad del sistema, hacer un uso racional de los recursos, y lograr más equidad en el acceso a la energía”*.

2.2. Matriz y seguridad energética

La matriz energética Argentina (figura 2) depende fundamentalmente de los derivados del petróleo (63,1% con una potencia instalada de 24.557 MW), volviéndola muy vulnerable ante la variación del precio y disponibilidad de los combustibles, principal dimensión del concepto denominado como seguridad energética (Escribano G., 2006).

Figura 2: Matriz energética Argentina. Abril 2019. Fuente: CAMMESA, 2019.



A pesar del objetivo establecido por la ley 27.191 para el año 2025, un informe de CAMMESA⁵ de abril de 2019 demuestra que las energías renovables sólo representan un 4,7% de la matriz energética, muy lejos del 20% que establece dicha legislación.

2.3. Panorama nacional y local

Actualmente, varias regiones de Argentina sufren la ausencia de diferentes recursos energéticos, y generalmente sucede donde su uso es fundamental para el bienestar de la población. Ejemplo de esto es el uso de gas natural para la generación de energía térmica, dependiente de la temperatura que se desarrolla en cada sitio (Gil & Deferrari, 1999).

Por este motivo, la ciudad de San Carlos de Bariloche se ha convertido en una zona de alta demanda de este combustible debido a su clima templado-frío (Sistema de Información Patagonia Norte, INTA). De momento, esta localidad cuenta con una red de gas natural que no logra cumplir con la totalidad de la demanda a raíz de la expansión que ha sufrido en los últimos años. Esto último, es

⁵Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico

consecuencia de las condiciones socioeconómicas de la ciudad, que la ha convertido en un polo de atracción permanente de personas, y ha hecho que la población deba acudir a otras alternativas para satisfacer sus necesidades energéticas. Dicha problemática persiste en el tiempo a pesar de las inversiones que se han realizado (González et al., 2006). Dentro de las opciones disponibles la leña, el gas envasado y la electricidad son los recursos más utilizados.

Según el autor citado anteriormente (González et. al., 2006), la mayoría de los hogares desconectados a la red de gas natural pertenecen a barrios periurbanos, con familias de menores recursos. Esto, sumado al uso de combustibles alternativos (leña, gas envasado y electricidad) más caros que el gas natural subsidiado, hace que esta situación sea aún mas desfavorable para los estratos sociales más bajos.

En virtud de ello, es necesario evaluar opciones distintas al gas natural, con el objetivo de elaborar un escenario a futuro donde las energías alternativas y la eficiencia energética formen parte de la política a implementar; todo esto, con la finalidad de garantizar el acceso a toda la población y disminuir los impactos que genera el consumo de los combustibles fósiles.

2.4. Energías alternativas

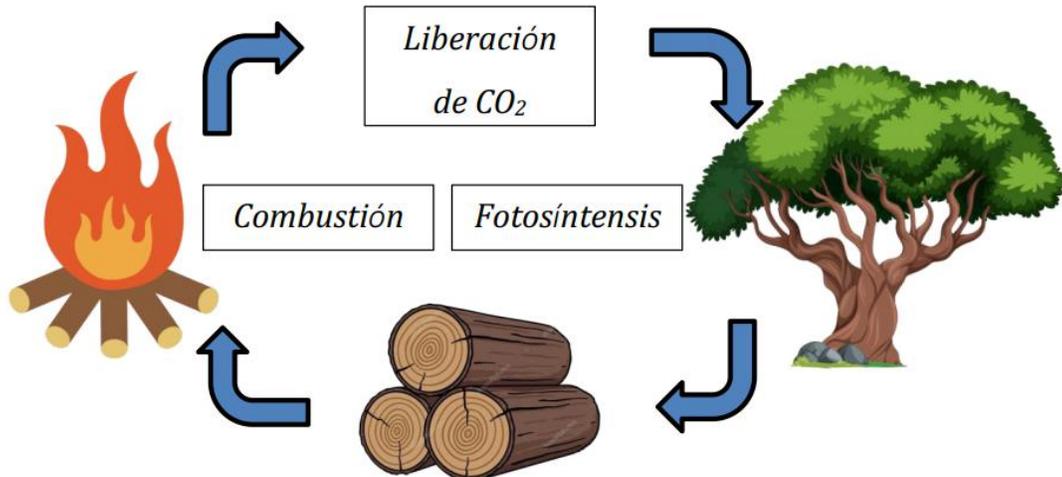
Actualmente, la UE cuenta con diversas fuentes de energías renovables entre las que se destacan, la hidráulica, la eólica, la solar, la geotérmica, la biomasa sólida, la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), el biogás y los biocombustibles. La energía obtenida mediante las últimas cuatro fuentes mencionadas se denomina bioenergía (Cerdá et. al., 2008), y su consumo en 2020 en la Unión Europea se estima en un valor de 121.929 kilotoneladas de petróleo equivalente (~13% del consumo energético anual), mayormente en el sector de uso térmico⁶.

⁶Dato extraído de <http://www.europeanbioenergyday.eu/about/european-bioenergy-day-concept/> (05/11/2020)

2.4.1. Bioenergía

La bioenergía es obtenida a partir de la materia orgánica, la cual puede ser empleada directamente como combustible, transformada previamente para obtener combustibles líquidos o gaseosos o ser un residuo de procesado o conversión (Cerdá et. al., 2008). Además, es considerada limpia ya que tiene la capacidad de capturar parte del dióxido de carbono generado en la combustión y su transformación mediante la fotosíntesis (figura 3) (Uasuf & Hilbert, 2012).

Figura 3: Balance de emisiones.



Comparándola con otras fuentes de energías renovables, la biomasa es una de las más confiables porque es almacenable y constante en su oferta. Además, si se hace un uso sustentable del recurso, ayuda con la conservación del ambiente, promueve la generación de empleo, fortalece a las comunidades energéticamente vulnerables, disminuye las emisiones de GEI, convierte residuos en recursos energéticos, permite el ahorro de grandes cantidades de dinero en combustibles fósiles, moviliza inversiones y fomenta el agregado de valor y nuevos negocios (FAO, 2017).

Según la definición de biomasa de la UE, las principales fuentes son los cultivos agrícolas y los bosques (Cerdá, 2012). Sin embargo, tanto bosques como cultivos,

deben ser manejados de manera correcta para convertir a la biomasa en un combustible ambientalmente sustentable.

2.5. Utilización de los residuos forestales de la región

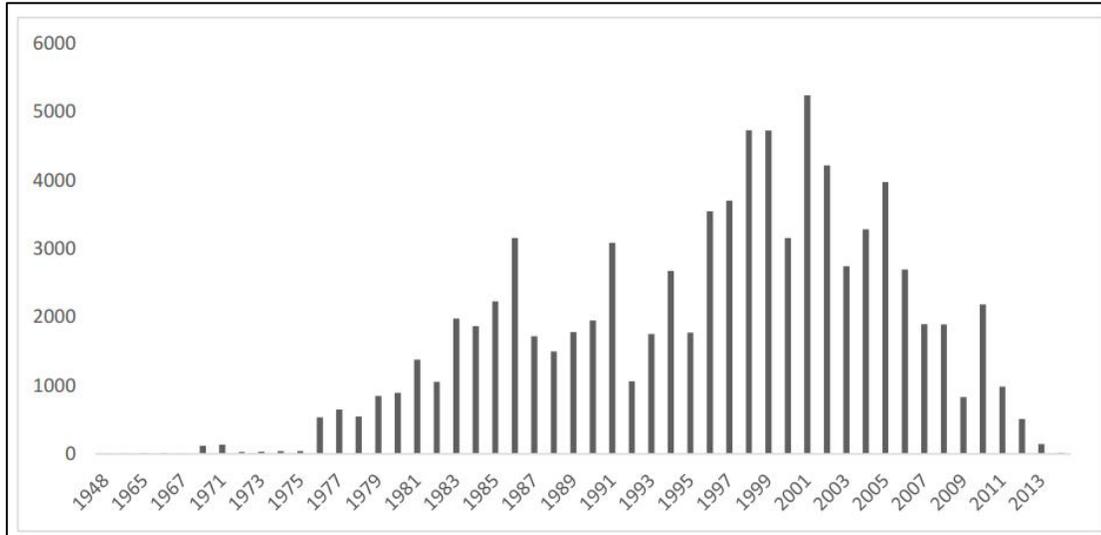
La región andino patagónica posee grandes extensiones de bosques, tanto nativos como plantaciones con especies exóticas (figura 4). Estas últimas precisan de las tareas de poda y raleo que son fundamentales para alcanzar los turnos de corta final con plantaciones forestales sanas y altamente productivas, pero su ejecución se traduce en costos elevados y generalmente no representa un retorno del capital invertido (Velázquez Martí, 2006). En la práctica, estas tareas producen grandes cantidades de residuos forestales⁷, que mediante diferentes técnicas es posible obtener un subproducto con valor comercial, disminuyendo el sobrante del manejo y aumentando el margen de rentabilidad económica de la actividad forestal (Diez et. al., 2017).

En el noroeste de la Patagonia argentina existen más de 100.000 hectáreas de coníferas implantadas, de las cuales un 1,5% se encuentra en la cuenca de Arroyo del Medio, cercana a San Carlos de Bariloche. La principal especie dentro de dichos cultivos es el *Pinus ponderosa*, alcanzando un 75% del total. Estas plantaciones se caracterizan por una muy elevada densidad de plantación (2400-3000 plantas por hectárea), que sumado a una falta de manejo forestal adecuado han generado la aparición de enfermedades fitosanitarias (Mattes Fernández et. al., 2010). Por ende, estas intervenciones silvícolas permitirían obtener grandes cantidades de biomasa, disminuir los riesgos de incendios, mejorar la calidad del remanente de la población y favorecer la economía de la actividad forestal (Diez et. al., 2017).

⁷Ramas, despuntes y madera fina.

Figura 4: Evolución de la superficie forestada en ha.año-1 (eje y) de Neuquén, Río Negro y Chubut.

Fuente: Inventario Nacional de Plantaciones Forestales. 2017



Como se menciona anteriormente, las opciones disponibles para satisfacer las necesidades energéticas son alternativas que entregan muy poca energía en cuanto a su valor en comparación con el gas natural (tabla 1). Esto se debe principalmente a que este último, y alguno de sus derivados como el GLP, se encuentran subsidiados en gran parte (alcanzando entre 50 y 60% de su valor en algunas regiones del país). Por otro lado, alguno de los combustibles alternativos como los pellets, tienen un elevado valor en la región andino patagónica debido a que son transportados desde el norte argentino. Por ello, la obtención de un combustible a partir de los residuos forestales de la zona podría revertir este panorama.

Para la correcta lectura de la tabla 1, hay que tener presente que la eficiencia de combustión de los dispositivos a pellets (~80-90%) es relativamente superior a los equipos que utilizan gas (~40-60%), lo que resulta en un mayor aprovechamiento de la cantidad de energía contenida en el combustible (González et.al., 2006).

Tabla 1: Comparación de valores de la unidad energética. Marzo 2020⁸

Combustible	Precio	kcal/\$
Gas Natural	2,51-2,96 \$/m ³	3306
Gas Natural Internacional	1,6 u\$d/MMBTU	2450
Gas Licuado de Petróleo	35 \$/kg	314
Pellet con humedad < 15%	23 \$/kg	187
Leña dura (25% humedad)	1500 \$/m ³	892

2.5.1. Características del residuo forestal

Los residuos generados a partir del manejo tanto de los bosques nativos, como de los cultivados (plantaciones con destinos de aserrío comercial), son recursos que generalmente son dejados en los mismos sectores donde son producidos. Esto se hace sin tener en cuenta que a partir de procesos modernos de transformación, como la densificación, se puede obtener energía térmica o eléctrica a gran escala (Atuesta Boada, 2015). Estos procesos de acondicionamiento de la materia son claves para que la biomasa sea considerada una alternativa viable. Sin estas transformaciones, la biomasa posee altos contenidos de oxígeno y humedad, bajo poder calorífico inferior y naturaleza hidrofílica, como también una baja densidad y una gran dificultad en su manejo (García-Ubaque et. al., 2013).

En la producción maderera se considera que de cada árbol completo solo se aprovecha un 20%, dejando un 40% en el campo conformado por ramas y raíces, y el otro 40% se pierde en el proceso de aserrío en forma de corteza y aserrín (Atuesta Boada, 2015).

⁸Datos extraídos de Secretaria de Energía de la República Argentina, Camuzzi Gas y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España.

2.5.2. De residuo forestal a pellet y chip

Dentro las posibilidades de transformación física la compactación del material brinda productos combustibles densificados, homogéneos en propiedades y dimensiones. Esto permite, en la mayoría de los casos, la automatización de los sistemas de alimentación y control de la combustión, además de una disminución en los gastos de transporte y almacenamiento (Ortíz, 2003). Una de las técnicas más reconocidas es la pelletización, mediante la cual se obtienen productos con densidades energéticas superiores a la biomasa convencional.

En síntesis, el proceso de pelletizado está conformado por las siguientes etapas: una de molienda y secado, una de pelletización y una de enfriamiento y tamizado. En la primera, se reduce el tamaño del material, generalmente chip o astilla, mediante molienda y es obligado a pasar por una malla del tamaño que se desea que tenga la materia prima previa a pelletizar. Luego, se seca el material para lograr la humedad objetivo necesaria para el proceso. Posteriormente se procede al pelletizado, donde la biomasa es sometida a pasar por una matriz con orificios la cual le da forma a los pellets mediante unos rodillos que presionan el material contra la misma, y levantan temperatura por la fricción entre metales. Por último, el producto caliente se enfría para que el combustible adquiera una mayor dureza, y se tamiza en un vibrotamiz para eliminar los polvos que son perjudiciales para la combustión.

Esta técnica modifica la materia prima otorgándole una mayor densidad aparente y mejor capacidad de almacenamiento, manejo y transporte. Además, esta transformación no cambia el poder calorífico de la biomasa utilizada. Sin embargo, ya que una porción del contenido de humedad es removido previamente, el poder calorífico inferior incrementa (Uasuf & Hilbert, 2012).

También, es posible utilizar astillas o chips como combustible para calefacción doméstica o generación de energía eléctrica. Este formato es un subproducto de los aserraderos, y de los procesos de tratamiento de los residuos forestales o de

poda urbana mediante una chipeadora. A pesar de tener una menor densidad energética que los pellets, este biocombustible es de gran relevancia ya que requiere de procesos menos complejos para su elaboración, lo que se traduce en menores costos.

Tanto chips como pellets difieren en varias de sus propiedades, siendo los primeros utilizados principalmente en instalaciones de mayor magnitud como consecuencia de la robustez de sus equipos. Generalmente, los pellets poseen menor humedad y por ende un mayor poder calorífico inferior; además, su densidad aparente es mayor, lo que implica mayor densidad energética. Sin embargo, es necesario estudiar las opciones disponibles en base a los requerimientos energéticos de cada aplicación (residencial, industrial, entre otros) para optar por el formato de combustible apropiado.

2.6. Impacto sobre la calidad de aire por el uso de la biomasa

Pese a todo lo enunciado, para lograr utilizar de manera sustentable la biomasa como fuente de energía es necesario analizar su potencialidad de uso mediante el estudio de calidad del combustible, como así también las características del proceso de combustión, y las emisiones liberadas a la atmósfera. Este último punto resulta de gran interés, ya que existen casos de ciudades que utilizan bioenergía y debido a la falta de un marco de regulación han generado un impacto local negativo en el aire. Esto ha sucedido en diferentes ciudades de Chile, en las cuales afirman que la calefacción domiciliar alimentada con madera afecta en gran medida a la calidad de aire respirable (Celis et. al, 2007). Por ello, es necesario evaluar esta alternativa antes de establecerla como una fuente ambientalmente viable para la calefacción domiciliar en la región.

3. Antecedentes y Justificación

3.1. Uso de la biomasa en Europa y Argentina

Según datos reportados por Eurostat (2018) sobre el consumo energético bruto de la UE, y las estimaciones realizadas por Bioenergy Europe sobre la cuota aportada por la bioenergía y las fuentes renovables en el año 2020, la biomasa sería capaz de cubrir en dicho año las necesidades energéticas de los 27 estados miembros de la UE durante 49 días corridos sin recurrir a otras fuentes de energía. Conforme a estos cálculos, la bioenergía representa el 58% de las energías renovables producidas en Europa, acaparando el 13% del consumo final de energía proyectado para el año 2020, lo que equivale a 121.920 kilotoneladas de petróleo equivalente (ktep)⁹.

Por otra parte, en Argentina la utilización de los residuos provenientes de la industria maderera en la generación de energía es reciente; exceptuando el uso histórico de la leña. Sin embargo, existen actividades energéticas desarrolladas o en pleno proceso de desarrollo que demandan un gran consumo de los mismos (Uasuf & Hilbert, 2012).

En las provincias de Neuquén y Chubut, ubicadas en la Patagonia argentina, se llevó adelante un estudio mediante la colaboración de la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA), la ex Secretaria de Ambiente de la Nación, el Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA), y el Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP), en el cual se estimó la biomasa de residuos proveniente del manejo forestal, y el volumen de residuos producto de la actividad de los aserraderos. Los resultados expuestos en el año 2008 demostraron que, la disponibilidad potencial de residuos procedentes de 44.600 hectáreas de forestaciones en la provincia de Neuquén era de 48.700 tn.año⁻¹, mientras que en 20.100 hectáreas de forestaciones en la provincia de Chubut se

⁹ Campaña del día Europeo de la bioenergía. Bioenergy Europe. <http://www.europeanbioenergyday.eu/>

podían obtener 24.500 tn.año⁻¹. Estos resultados comprenden la biomasa resultado del raleo y de residuos (despuntos y ramas). Por otro lado, los residuos generados en la industria de los aserraderos, que incluyen aserrín y otros residuos sólidos, proveerían 9.000 tn.año⁻¹ en Neuquén y 9.800 tn.año⁻¹ en Chubut (Loguercio, et. al., 2008).

Por esta razón, el desarrollo de procesos que permitan el aprovechamiento energético y disposición final de estos residuos es una de las aristas más interesantes a tratar dentro de la política energética y ambiental de nuestro país (García-Ubaque, 2013).

3.2. Plan calor

Ante el actual déficit de gas natural por red, el Ministerio de Desarrollo Social de Río Negro lleva adelante el Plan Calor que cubre de manera parcial las necesidades energéticas de la población. Este programa abastece de leña y gas envasado a aquellas familias que se encuentran en situación de vulnerabilidad por ausencia del servicio¹⁰.

La promoción de la bioenergía mediante este tipo de programas no solo resolvería parcialmente la falta de gas en la región, sino que también sería un impulso para que la actividad forestal logre llevar adelante las tareas necesarias para el manejo de las plantaciones. Esto debería ser acompañado con la sustitución de los quemadores convencionales de biomasa por estufas de mayor rendimiento, y mejoras en la calidad del combustible que actualmente se entrega. Además, es posible generar un marco de trabajo donde se desarrollen nuevos puestos laborales y personal capacitado vinculado a la temática. De todas formas, el desarrollo de este escenario debe ser respaldado por un estudio del impacto que

¹⁰Plan Calor, Ministerio de Desarrollo Social, Gobierno de la provincia de Río Negro.

<https://www.rionegro.gov.ar/?contID=44633>

generaría la utilización masiva de biomasa en el ambiente, y de esta manera evitar problemáticas a futuro no deseadas.

4. Objetivo

Este Trabajo Final Integrador tiene como meta evaluar la calidad de los combustibles elaborados a partir de residuos forestales de *Pinus ponderosa*, y comparar las emisiones generadas por equipos de alta eficiencia con normativas vigentes y futuras.

4.1. *Objetivos específicos*

1. Realizar ensayos sobre la calidad de los biocombustibles (astillas y pellets) elaborados con residuos del manejo de *Pinus ponderosa*.
2. Estudiar las propiedades de su combustión y cuantificar las emisiones generadas de material particulado y monóxido de carbono.
3. Evaluar los resultados, tanto de la calidad de los biocombustibles, como las propiedades de la combustión y sus emisiones, de acuerdo a estándares establecidos en normativas nacionales e internacionales.

5. Alcance

Se evaluó la calidad de astillas y pellets generados a partir de residuos forestales, su comportamiento energético y las emisiones de material particulado total (MPT) y monóxido de carbono (CO).

Se ensayaron biocombustibles sólidos elaborados a partir de los subproductos del manejo de la especie forestal *Pinus ponderosa*, y se prepararon diferentes muestras en formato de astillas y pellets.

Para los ensayos de combustión y evaluación de las emisiones atmosféricas se utilizó una estufa a pellet y una caldera a chips.

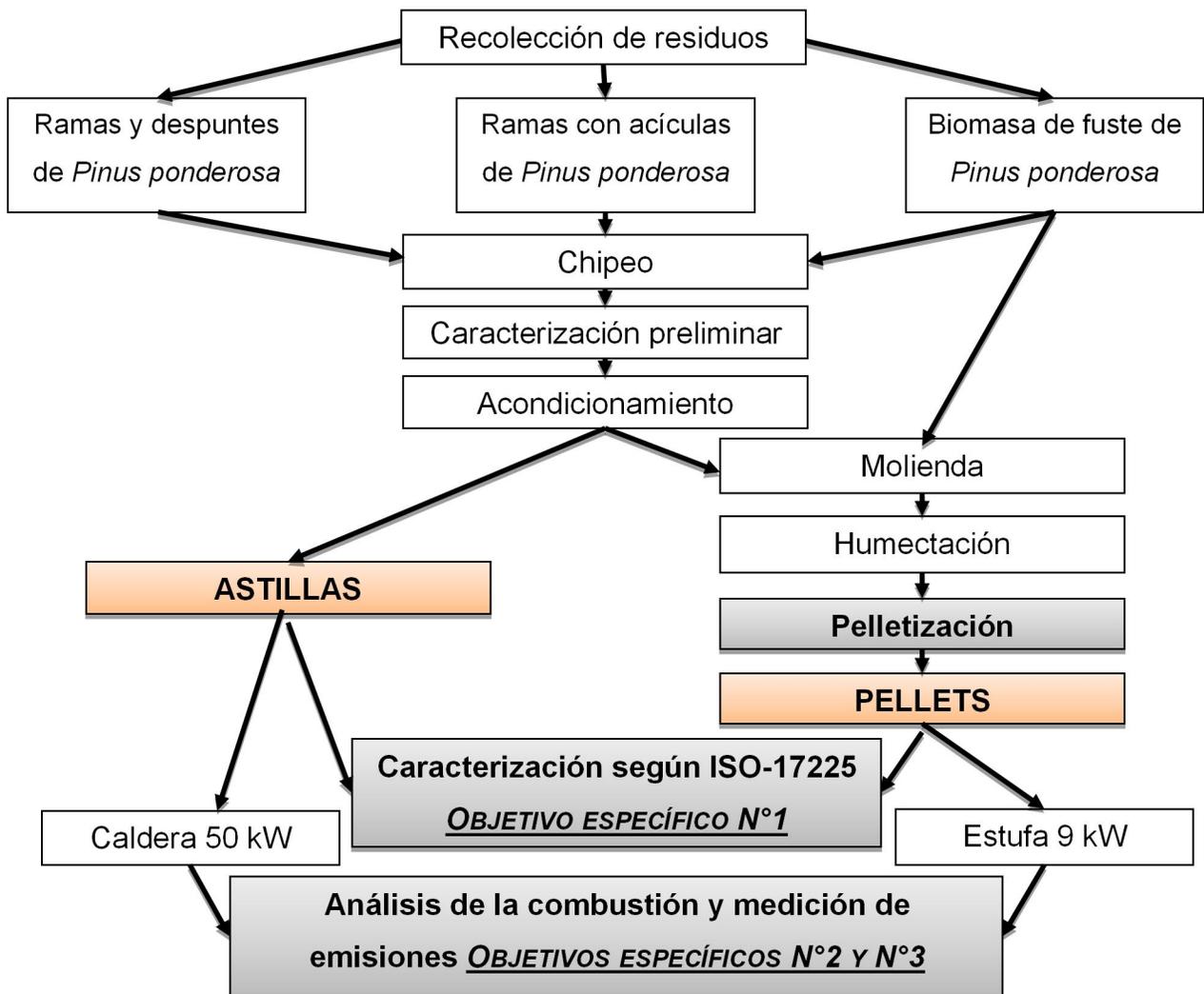
6. Hipótesis

La producción de pellets y astillas de *Pinus ponderosa* cumple con los requisitos de calidad ISO 17225-2 y 17225-4, y su combustión genera emisiones por debajo de los límites establecidos por normativas vigentes y futuras.

7. Metodología y resultados

El trabajo buscó determinar el desempeño energético y ambiental de los combustibles resultantes del procesamiento (chipeado y pelletización) de residuos del manejo de plantaciones de *Pinus ponderosa*. La evaluación se realizó a partir de las características físico-químicas del material, las propiedades de su combustión, y las emisiones generadas. En la figura 5 se puede observar el esquema de trabajo llevado adelante.

Figura 5: Diagrama de trabajo



7.1. Recolección de los subproductos del manejo forestal

La recolección se realizó en dos sitios cercanos a la ciudad de San Carlos de Bariloche. El primero en la cuenca Arroyo del Medio, en una plantación de la estancia La Veranada (figura 6 y 7), y el segundo en un bosque cercano a la delegación del Servicio Forestal Andino (SFA) y CIEFAP (figura 8).

Figura 6: Plantación y residuos forestales de estancia La Veranada (-41.233146, -71.187688)



Los residuos fueron categorizados de la siguiente manera:

- 1- Tronco o fuste con corteza de *Pinus ponderosa* ($\phi^{11} > 200$ mm) (figura 9)
- 2- Ramas y despuntes de *Pinus ponderosa* sin acículas ($\phi < 100$ mm)
- 3- Ramas de *Pinus ponderosa* con acículas ($\phi < 25$ mm)

De aquí en más se los nombrará 1-fuste, 2-ramas y 3-follaje, respectivamente.

Esta categorización se estableció con el objetivo de analizar por separado las diversas partes que componen al residuo forestal, y de esta manera poder estimar su comportamiento en base a la estructura que tenga cada uno en particular. El intervalo de diámetros entre 100 y 200 mm quedó fuera ya que ni ramas, despuntes y fuste tenían dichas medidas.

¹¹ Diámetro

Cabe aclarar que la corriente de fuste, entendiendo este término como todos los residuos que componen a esta categoría, está conformada por dos materias primas iniciales. Para la producción de pellets se utilizó material de fuste sin corteza cedido por laboratorios de CIEFAP, y para la generación de astillas fuste con corteza de las inmediaciones del SFA.

Figura 7: Residuos forestales de estancia La Veranada



Figura 8: Residuos forestales SFA (-41.127070, -71.424146)



Figura 9: Biomasa de fuste para producción de pellets (izquierda) y chips de fuste (derecha)



Luego de la recolección el material fue almacenado en bolsones para áridos de 1m³ bajo techo con el objetivo de no alterar sus características originales.

Para las corrientes con altos contenidos de humedad se realizó un secado forzado en secador de 3440 kcal/hora (~4 kW) para evitar que el material comience a degradarse biológicamente. Previamente las corrientes fueron evaluadas mediante la norma ASTM E1358, la cual brinda un método rápido y sencillo para la determinación de la humedad. Estos ensayos se realizan por triplicado tomando las muestras de diferentes sectores de la pila. Un ejemplo, fueron las ramas con follaje las cuales poseían más de un 50% de humedad (tabla 2).

Tabla 2: Humedad de las ramas con acículas de Ea La Veranada.

Muestra	Humedad ($\pm 1\%^{12}$)
Follaje (Muestra 1)	51
Follaje (Muestra 2)	53
Follaje (Muestra 3)	53

7.2. Chipeado

Los residuos fueron chipeados (figura 10) obteniendo las astillas que, según el formato de combustible deseado, se transformaron en pellets o se utilizaron para alimentar la caldera. De esta etapa se obtuvieron aproximadamente 1m³ de las siguientes corrientes de residuos (figuras 11 y 12):

- ◆ Chips de fuste de *Pinus ponderosa*
- ◆ Chips de ramas de *Pinus ponderosa*
- ◆ Chips de follaje de *Pinus ponderosa*

¹² Error del procedimiento

Figura 10: Chipeado de residuos forestales



Figura 11: Ramas y despuntes (izquierda) y ramas con acículas -follaje- (derecha)



Figura 12: Chips de fuste (izquierda), Chips de follaje(medio), y chips de ramas (derecha)



7.3. Acondicionamiento y caracterización de la materia prima

7.3.1. Chips

Seguidamente, se separaron los volúmenes de biomasa destinados a la caldera (chips) de la materia prima para el proceso de pelletización.

A las astillas destinadas a la caldera se las tamizó con la ayuda de un vibrotamiz con malla de 3 mm (extracción de finos y gruesos) para obtener la granulometría necesaria para el normal funcionamiento de la caldera, y en los casos en que fue necesario se le realizó un secado forzado en el secador de biomasa utilizado anteriormente para alcanzar la humedad requerida por el equipo (<30%).

En esta ocasión, los contenidos de humedad se obtuvieron mediante el método ISO 18134-2 (figura 13), el cual mide con mayor precisión que el método de microondas (ASTM E1358). Esto se realizó de esta manera ya que en esta segunda etapa hacia falta un valor más preciso para poder ajustar los procesos de elaboración de los biocombustibles. Este procedimiento consiste en pesar aproximadamente 100 gramos de biomasa en sus condiciones originales, y someterla a 105°C en estufa de laboratorio hasta obtener una masa constante. Esto se realiza mediante el registro del peso en intervalos no menores a 60

minutos. La norma utilizada sugiere la realización de prueba y contraprueba en simultáneo, y los 4 valores que se observan en la tabla 3 son el resultado de realizar el procedimiento por duplicado.

Tabla 3: Humedad de residuos forestales recientemente chipeados mediante método ISO 18134-2.

Muestra	Humedad ($\pm 0,1\%$)				Promedio
Chips de fuste de <i>Pinus ponderosa</i> con corteza	30,0%	29,7%	27,9%	28,9%	29,1%
Material de fuste de <i>Pinus ponderosa</i> ¹³	7,4%	7,3%	7,9%	7,9%	7,6%
Chips Ramas de <i>Pinus ponderosa</i>	40,1%	40,6%	42,9%	42,7%	41,6%
Chips de follaje de <i>Pinus ponderosa</i>	33,7%	32,9%	33,2%	33,0%	33,2%

Figura 13: Humedad mediante método ISO para material de fuste molido (arriba), chips de ramas (medio), y chips de follaje (abajo)



¹³Materia prima para producción de pellets

Figura 14: Secado de chips obtenidos a partir de ramas de *Pinus ponderosa*



En paralelo se realizaron análisis de densidad aparente a las astillas, previo al tamizado y secado, mediante los procedimientos establecidos en ISO 17828 (tabla 4). Esta técnica consiste en pesar la masa contenida en un balde de 50 litros previamente compactada por duplicado ($n=2$). El cálculo para obtener el parámetro en base seca se realiza por medio del contenido de humedad obtenido anteriormente.

Tabla 4: Densidad aparente de chips y astillas.

Muestra	$\rho_{\text{aparente}} (\pm 10 \text{ kg/m}^3)$	Humedad ($\pm 0,1\%$)	$\rho_{\text{aparente}} (\pm 10 \text{ kg/m}^3)$ en base seca
Chips de fuste ¹⁴	180	29,1%	130
Chips de ramas	300	41,6%	170
Chips de follaje	160	33,2%	110

¹⁴Material tamizado en vibrotamiz con malla de 3 mm.

Figura 15: Densidad aparente de chips de fuste (izquierda), chips de ramas (medio) y chips de follaje (derecha)



7.3.2 Pellet

La biomasa a densificar debió ser acondicionada previamente ya que el proceso de pelletizado así lo requiere. Primero se seco la materia prima en el secador de biomasa, luego se molió mediante molino martillo con malla de 4 mm para obtener la granulometría deseada (figura 16), y luego se homogeneizó el contenido de humedad mediante humectación, estabilizándolo en el valor estimado como óptimo para el proceso de pelletizado. Este último factor es considerado el de mayor influencia en la calidad final de los pellets, ya que ayuda en la refrigeración y la aglomeración del material. Según lo citado por Zapata Saad en 2016, se han conseguido buenos rendimientos con humedades entre 8 y 15%, aunque generalmente dependa específicamente de la biomasa a utilizar.

Figura 16: Molienda del material

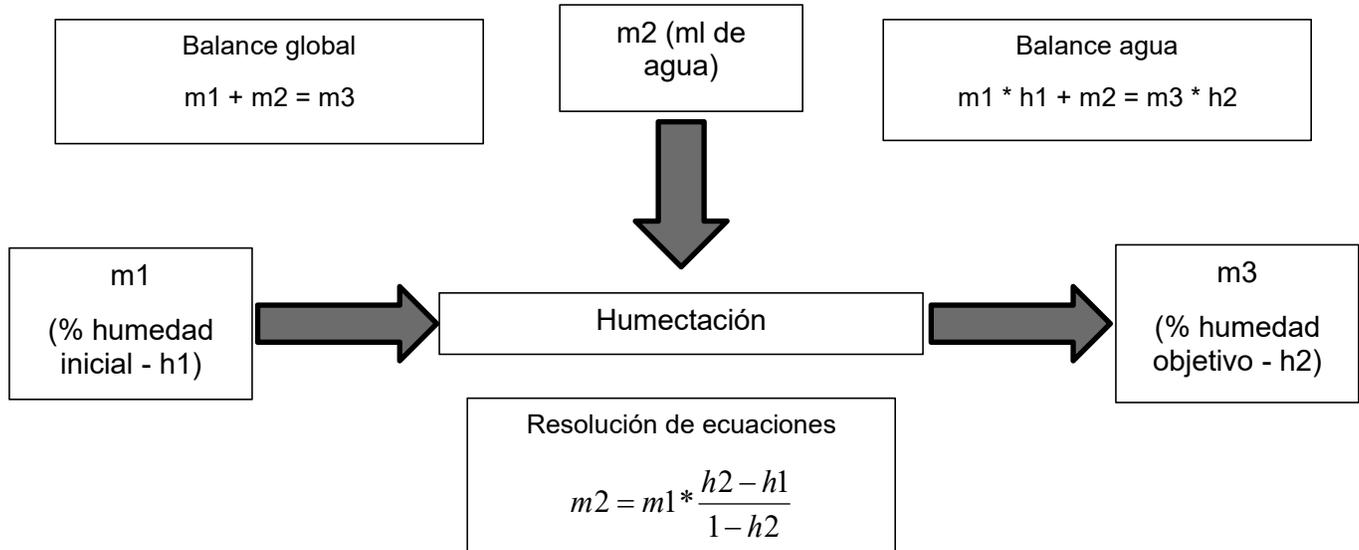


Mediante balance de masa (figura 17) se obtuvo la cantidad de agua necesaria por kg de material (con humedad definida) para alcanzar la humedad objetivo (tabla 5). El contenido de humedad se obtuvo mediante método de microondas (ASTM E-1358). En esta ocasión, se desestimo la utilización de un método más exhaustivo (Ej: 18134-2) ya que el proceso de humectación utilizado no necesitaba de un valor preciso.

Tabla 5: Humectación de las materias primas para pelletización

Material	Humedad (±1%)	Humedad objetivo (%)	ml de agua/kg de material
Material de fuste	7	16	99
Material de ramas	10	16	64
Material de follaje	16	16	0

Figura 17: Diagrama del proceso de humidificación



7.4. Pelletización

Una vez finalizadas las tareas de acondicionamiento y caracterización de la materia prima se comenzó con la pelletización de cada una de las corrientes (figuras 18 y 19).

Figura 18: Astillas de ramas de *Pinus ponderosa* (izquierda) y el producto de su molienda (derecha)



Figura 19: Materia prima y pellets: Ramas (izquierda), follaje (medio) y fuste (derecha)



Durante el proceso de pelletización se registraron los siguientes parámetros:

Tabla 6: Parámetros de pelletización

Residuo	Fuste	Ramas	Follaje
Longitud de los orificios de la matriz (mm)	36,0	36,0	41,7
Tensión (V)	250	300-305	300
Consumo (A)	7-9	6-7	7-9
Potencia media (kW)	2,0	2,0	2,4
Velocidad del rodillo (rpm)	147	152	208
T°¹⁵ Salida de vibrotamiz (°C)	56	60	60
T° Salida de la pelletizadora (°C)	76	80-82	80
T° Matriz (°C)	92-97	87	85-90
T° Material (°C)	11	10	12
Caudal másico (kg/h)	17,8	18,7	16,2

¹⁵ Temperatura

7.5. Caracterización de los biocombustibles

Una vez finalizada la etapa de producción se analizaron los combustibles en base a procedimientos establecidos por normativas internacionales. Para los dos formatos se determinaron los siguientes parámetros:

- ✓ Origen y fuente (EN 17225-1): Se determina el origen y el tipo de biomasa en base a categorías establecidas en la norma.
- ✓ Densidad aparente (ISO 17828): Se pesa la masa contenida y compactada en balde normalizado de 50 litros para astillas y de 5 litros para pellets.
- ✓ Determinación del contenido de humedad (ISO 18134-2): Se colocan aproximadamente 100 gramos de biomasa en estufa de laboratorio a temperatura controlada (105°C) hasta obtener un peso constante (medición cada intervalos no menores a 60 minutos)
- ✓ Determinación del contenido de cenizas (ISO 18122): Se coloca 1 gramo de material molido y tamizado (<1 milímetro) en crisol, y es llevado a mufla con una rampa de temperatura controlada que alcanza los 550°C. Luego de 4 horas se pesa el producto de la cenificación en balanza analítica.

Exclusivamente para los pellets:

- ✓ Determinación de diámetro y longitud (ISO 17829): Se seleccionan al azar 50 pellets a los cuales se les mide la longitud y 10 unidades para el diámetro. En base a los resultados obtenidos se calcula el promedio y desvío estándar.
- ✓ Durabilidad mecánica (ISO 17831-1): Se somete una muestra de 500 gramos de biomasa tamizada a agitación mecánica (50 revoluciones/minutos por 10 minutos). Al finalizar este proceso se tamiza el material (malla de 3.15 milímetros) para eliminar polvos producto de la fragmentación de los pellets y se pesa el material retenido por dicho tamiz.

Exclusivamente para las astillas:

✓ Distribución de tamaño de partículas (ISO 17827): Se extraen 8 litros del material fuente y se lo hace pasar por un tamizador compuesto por 6 mallas (63; 46; 31,5; 16; 8; 3,15) y una bandeja colectora en orden decreciente desde arriba hacia abajo. Luego se pesa el material retenido en cada una de las mallas y se calcula la fracción correspondiente.

Los valores exhibidos en las tablas son el promedio de los resultados obtenidos en cada una de las muestras ensayadas. Además, a la derecha del mismo se presenta el desvío estándar y la categoría que le corresponde a ese valor (promedio), la cual es establecida por ISO 17225. En su mayoría, se realizó prueba y contraprueba de cada una de las muestras (n=2).

Por último, y en base a los valores obtenidos se le asigna a cada combustible una clase o etiqueta de calidad establecida por ISO 17225-2 para pellets (tabla 7) e ISO 17225-4 para astillas (tabla 8). Estas normas apoyan y fomentan el uso de combustibles clasificados en edificios residenciales, públicos y comerciales pequeños por las siguientes razones:

- ✓ *Los equipos de pequeña escala no suelen contar con controles avanzados ni limpieza de los gases de combustión.*
- ✓ *En su mayoría no están manipulados por personal calificado.*
- ✓ *Con frecuencia se encuentran en zonas residenciales y poblados.*

Tabla 7: Etiquetas de calidad para pellets establecidas por ISO 17225-2

	Clase de propiedad/ método de análisis	Unidades	A1	A2	B
Normativo	Origen y fuente, IRAM 17225-1	--	1.1.3 madera de tronco 1.2.1 residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1.1 árboles enteros sin raíces 1.1.3 madera de tronco 1.1.4 residuos de cosecha forestal 1.2.1 residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1 madera de bosques, plantaciones y otras maderas vírgenes 1.2 subproductos y residuos de la industria maderera 1.3.1 madera usada no tratada químicamente
	Diámetro, D ^b y longitud, L ^c , ISO 17829, de acuerdo con la figura 1	mm	D0.6: 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00 D0.8: 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D0.6: 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00 D0.8: 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00	D0.6: 6,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00 D0.8: 8,00 ± 1,00; 3,15 < L ≤ 40,00
	Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	%(m/m) según se recibe, en base húmeda	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Ceniza, A ^d , ISO 18122	%(m/m), en base seca	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2.0 ≤ 2,0
	Durabilidad mecánica, DU, ISO 17831-1	%(m/m) según se recibe	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Finos, F ^e , ISO 18846	%(m/m) según se recibe	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Aditivos ^f	%(m/m) según se recibe	≤ 2 Declarar tipo y cantidad	≤ 2 Declarar tipo y cantidad	≤ 2 Declarar tipo y cantidad
	Poder calorífico inferior, Q, ISO 18125	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6
	Densidad aparente, BD ^g , ISO 17828	kg/m ³ según se recibe	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600

Tabla 8: Etiquetas de calidad para astillas establecidas por ISO 17225-4

	Clase de propiedad, método de análisis	Unidades	A		B	
			1	2	1	2
Normativo	Origen y fuente, IRAM 17225-1	--	1.1.1 árboles enteros sin raíces ^a 1.1.3 madera de tronco 1.1.4 residuos de cosecha forestal 1.2.1 residuos de madera no tratada químicamente	1.1.1 árboles enteros sin raíces ^a 1.1.3 madera de tronco 1.1.4 residuos de cosecha forestal 1.2.1 residuos de madera no tratada químicamente	1.1 madera de bosques, plantaciones y otras maderas vírgenes ^b 1.2.1 residuos de madera no tratada químicamente	1.1 madera de bosques, plantaciones y otras maderas vírgenes ^b 1.2 subproductos y residuos de la industria maderera ^f 1.3.1 madera usada no tratada químicamente
	Tamaño de partícula, P, ISO 17827-1	mm	Seleccionar de la tabla 1		Seleccionar de la tabla 1	
	Humedad, M ^c , ISO 18134-1, ISO 18134-2	%(m/m)	M10 ≤ 10 M25 ≤ 25	M35 ≤ 35	Declarar el valor máximo	
	Ceniza, A, ISO 18122	%(m/m), en base seca	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0	
	Densidad aparente, BD ^d , ISO 17828	kg/m ³ suelto según se recibe	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250	BD150 ≥ 150 BD200 ≥ 200 BD250 ≥ 250 BD300 ≥ 300	Declarar el valor mínimo	

7.6. Caracterización pellets

Tabla 9: Ensayos de caracterización energética para biocombustibles en formato pellet

Propiedad		Norma Referencia	Fuste			Ramas			Follaje		
Origen y fuente		ISO 17225-1	1.1.3			1.1.4			1.1.4		
Humedad ($\pm 0,1\%$)		ISO 18134-2	8,4	0,0	M10	9,2	0,1	M10	9,7	0,0	M10
Densidad aparente (± 10 kg/m ³)		ISO 17828	670	4	BD650	680	3	BD650	620	3	BD600
ρ aparente en base seca (± 10 kg/m ³)		ISO 17828	610	4		610	3		560	2	
Cenizas ($\pm 0,1\%$)		ISO 18122	0,3	0,0	A0.5	1,5	0,1	A1.5	2,4	0,1	A3.0
Dimensiones	Diámetro/SD ¹⁶ ($\pm 0,1$ mm)	ISO 17829	6,0	0,1	D06	6,1	0,1	D06	6,1	0,1	D06
	Largo/SD ($\pm 0,1$ mm)		9,9	4,4		12,9	4,1		14,2	4,0	
Clasificación		ISO 17225-2	A1			B			I3 ¹⁷		

¹⁶Con formato Inglés (Estados Unidos): Standar Deviation

¹⁷"I3": Categoría de pellet industrial no recomendable para usos domésticos

Figura 20: Determinación de cenizas para pellets fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha)



Figura 21: Determinación de densidad aparente de pellets de fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha)



Figura 22: Análisis dimensional de pellets Pinus ponderosa



Figura 23: Cenizas de pellets de fuste (izquierda), ramas (medio) y follaje (derecha)



7.7. Caracterización astillas

Tabla 10: Ensayos de caracterización energética para biocombustibles en formato astilla

Propiedad	Norma Referencia	Fuste			Ramas			Follaje		
Origen y fuente	ISO 17225-1	1.1.3			1.1.4			1.1.4		
Humedad ($\pm 0,1\%$)	ISO 18134-1	10,1	0,0	M15	16,6	0,0	M20	18,0	0,3	M20
Densidad aparente ($\pm 10 \text{ kg/m}^3$)	ISO 17828	150	2	BD150	220	0	BD200	140	6	-
ρ aparente en base seca ($\pm 10 \text{ kg/m}^3$)	ISO 17828	140	2	-	180	0	-	110	5	-
Cenizas ($\pm 0,1\%$)	ISO 18122	0,6	0,0	A0.7	1,5	-	A1.5	2,4	-	A3.0
Finos ($\pm 0,1\%$) <3.15 mm	ISO 17827	0,9	0,2	F05	2,9	1,8	F05	7,8	-	F10
Distribución de tamaño de partícula	ISO 17827	P16S			P16S			-		
Clasificación	ISO 17225-4	A1			A2			B1		

7.8. Ensayos de combustión y medición de las emisiones

Concluida la caracterización de los biocombustibles sólidos se prosiguió con los ensayos de combustión de los mismos. En esta instancia los pellets fueron probados en una estufa de 9 kW marca Mocca (origen China) y las astillas en una caldera de 50 kW Hargassner (origen Austria). Esta última, considerada “Clase 5” según la norma española UNE-EN 303-5 en cuanto a calidad (etiqueta máxima) se configuró de manera que entregué la máxima potencia posible durante los ensayos; dicho dispositivo cuenta con una sonda lambda para maximizar la eficiencia de la combustión. Por otro lado, la estufa es uno de los equipos más económicos en el mercado local, y no tiene la capacidad de ajustar el exceso de aire para lograr una combustión estequiométrica. Este dispositivo es capaz de brindar diferentes niveles de potencia mediante la dosificación del combustible. Para lograr la potencia máxima (P1) el equipo suministra pellets a una tasa más rápida que en el resto (P2, P3 y P4). Los ensayos de este trabajo fueron realizados en la potencia mínima (P4 ~ 5kW), ya que en mediciones previas realizadas en el resto de las potencias el filtro, en el cual se capturan los contaminantes, se obstruía en un intervalo de tiempo muy corto (P1, P2 y P3), impidiendo la realización de un procedimiento confiable.

Figura 24: Caldera Hargassner 50 kW (izquierda) y estufa a pellet Mocca 9 kW (derecha)



Para los ensayos de combustión se utilizaron principalmente dos equipos de medición. Para la medición de monóxido de carbono (CO), oxígeno remanente (O₂) y temperatura de gases en chimenea se utilizó un analizador de gases de combustión marca Testo modelo 310 el cual además, mediante cálculos, proporciona otros parámetros como: monóxido de carbono corregido al 0% de O₂ (μ CO), dióxido de carbono (CO₂), lambda (λ indica la relación de oxígeno estequiométrico necesario y el oxígeno real) y la eficiencia de la combustión (η). Estos cálculos están asociados a un combustible en particular (categorías para configurar el equipo de medición), siendo pellet (“PELL”) y madera al 20% de humedad (“Wood20”) las configuraciones utilizadas en el equipo de medición.

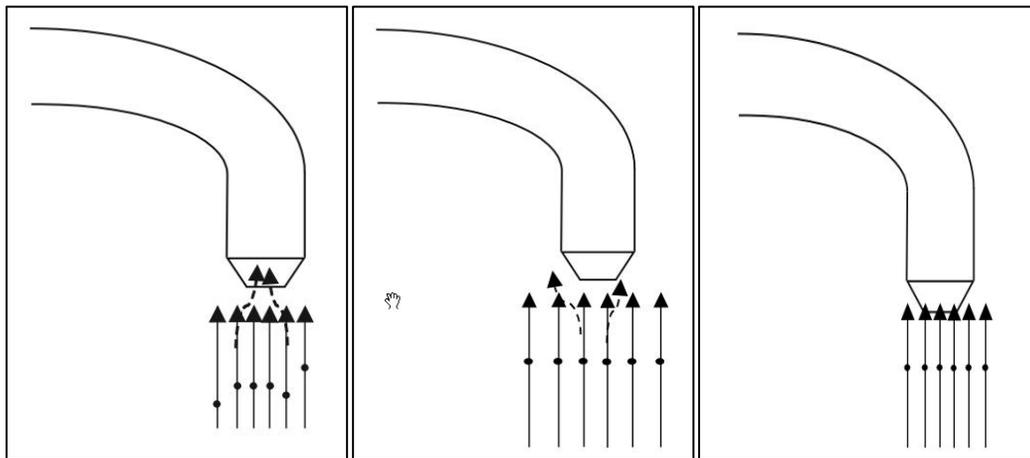
Por otro lado, para medir el material particulado total se utilizó un muestreador isocinético de gases, el cual mediante método gravimétrico permite conocer la concentración en la fuente de emisión. La tarea se efectúa mediante la captura de los contaminantes en un filtro HEPA¹⁸ que posee un 99,97% de eficiencia en la retención de partículas de 0,3 μ m de diámetro. Este equipo posee la capacidad de extraer el contaminante a la misma velocidad con la cual circula por la chimenea; característica importante ya que al encontrarse en estado sólido, el contaminante posee momento, y si este no es extraído a la misma velocidad con la que se mueve por el ducto se desviaría el valor obtenido de la concentración real por la inercia de las partículas.

Como puede observarse en la figura 25, existen 3 tipos de muestreos vinculados a este tipo de equipos; el primero, el muestreo hiper-isocinético en el cual la velocidad de muestreo es mayor a la velocidad de la chimenea desviando la trayectoria del gas, pero no de las partículas haciendo que el valor sea menor al real. El segundo, el sub-isocinético es exactamente a la inversa, al existir un punto de estancamiento en la boquilla de muestreo a raíz de que la velocidad de extracción es menor a la velocidad del flujo se deflecta el gas pero las partículas

¹⁸Con formato Inglés (Estados Unidos): High Efficiency Particulate Air

tienden a seguir la trayectoria que tenían, generando un valor de concentración mayor al real. Por último, el isocinético es el muestreo ideal, donde se igualan las velocidades de extracción y de velocidad del flujo (Bajano, 2006). Según cada norma existen límites de tolerancia para desviarse del isocinetismo, siendo de 90 a 110% para el método USEPA 5 y de 70 a 150% en UNE-EN 303-5.

Figura 25: Muestreo Hiper-isocinético (izquierda), muestreo Sub-isocinético (medio) y muestreo isocinético (derecha). Fuente: Bajano (2006)



La metodología empleada para determinar la concentración de MPT en este trabajo es la descrita en los métodos 5 y 17 de la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA).

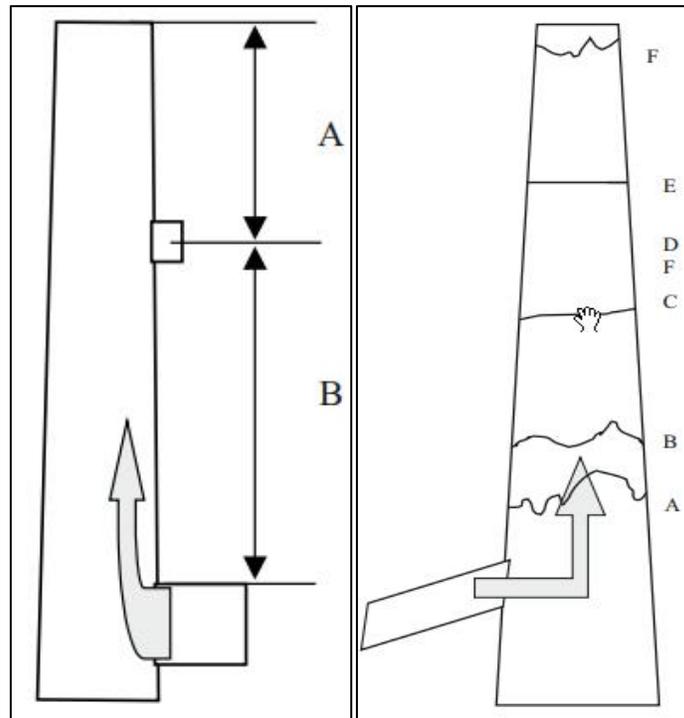
El método USEPA 5, además, requiere de otros métodos establecidos por este mismo organismo (USEPA 1, USEPA 2, USEPA 3 y USEPA 4).

El método USEPA 1 describe el método para la selección de los puntos de muestreos. Por ejemplo, determina la ubicación de los puertos de muestreo, que serán dos o cuatro dependiendo del diámetro de la chimenea, y también los puntos a medir en la sección transversal de la chimenea.

El método USEPA 2 describe la determinación de la velocidad del gas, la cual debe ser realizada en simultáneo con la toma de muestra. Esto se debe a que el

perfil de velocidades del gas que circula en la chimenea no es constante, y por este motivo es necesario ajustar punto a punto la velocidad de extracción del gas.

Figura 26: Determinación del puerto de muestreo (izquierda) y desarrollo del perfil de velocidades en una chimenea (derecha). Fuente: Bajano (2006)

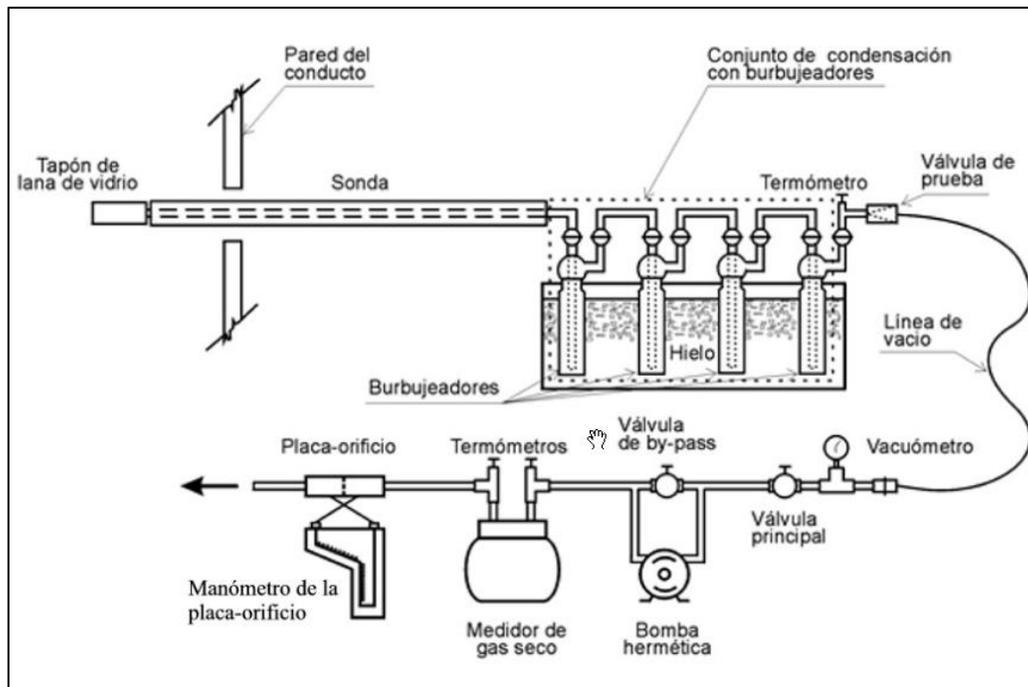


El método USEPA 3 especifica los pasos necesarios para conseguir el peso molecular del gas y su composición. Para conseguir el valor se considera que el gas está conformado por CO_2 , O_2 , nitrógeno molecular (N_2) y CO . Luego, conociendo los pesos moleculares de cada compuesto, y sabiendo que el peso molecular del nitrógeno y del monóxido de carbono son iguales, solo es necesario medir la concentración volumétrica de oxígeno y de dióxido de carbono. Por último se multiplica la fracción correspondiente a cada gas por su peso molecular y se suman cada uno de estos términos.

El método USEPA 4 detalla la metodología necesaria para conocer la humedad del gas. Esta se realiza mediante un sistema condensador en el cual se ensamblan 4 burbujeadores o impigners en serie que se encuentran en contacto

con un baño de agua fría. El gas es obligado a pasar por este sistema y al finalizar el muestreo se colecta toda el agua que contenía el gas. El dato se obtiene del peso inicial de cada uno de los impigners, de los cuales los dos primeros contienen una cantidad inicial de agua y el último de silica gel para extraer el remanente de humedad, menos el peso final de cada uno de estos. Este sistema, además, sirve como protección de la bomba para evitar que se corroan sus componentes.

Figura 27: Diagrama del tren de muestreo para el método USEPA 4. Fuente: Bajano (2006)



Por otro lado, el método USEPA 17 ofrece una modificación del tren de muestreo de gran importancia. En este método el portafiltro se coloca dentro de la chimenea, haciendo que la temperatura alrededor del filtro sea igual a la temperatura del gas, mientras que en el USEPA 5 el portafiltro se encuentra dentro de una “caja caliente” que mantiene la temperatura de forma constante a 120°C. El objetivo tanto de la “caja caliente” como el portafiltro dentro de la chimenea es evitar la condensación de la humedad del gas en el filtro.

Todos los métodos descritos fueron desarrollados para chimeneas de actividades industriales y diámetros mínimos de 30 centímetros. En este trabajo en particular, los ductos son de diámetros menores, y por este motivo se realizaron algunas modificaciones en las metodologías.

Primeramente, el tren de muestreo utilizado no contaba con la denominada “caja caliente”. Como consecuencia de esto se resolvió utilizar la metodología USEPA 17, pero con la salvedad de que el portafiltro no lograba ingresar en el puerto de muestreo por los pequeños espacios de las chimeneas. De esta manera el filtro quedaba en contacto con el aire circundante, y con la posibilidad de que condense humedad en el filtro. Este problema fue resuelto a partir de la medición de temperatura del portafiltro durante el muestreo con un termómetro infrarrojo, y un posterior chequeo visual para cotejar la ausencia de agua en el filtro al finalizar.

La otra modificación realizada sobre la metodología fue la toma de un único punto de muestreo en el medio del ducto, primero por el reducido espacio que existía para desplazar la boquilla de muestreo, y segundo para evitar que agua de condensación que se formaba en la línea de muestreo no pueda volver al filtro durante su manipulación. Esto último se resolvió a partir de un primer muestreo con diferentes puntos en el que se observó al final del mismo que el filtro se había mojado con el agua que se formaba en la línea de acero inoxidable siguiente al portafiltro de bronce. Además, se advirtió que en los muestreos de combustibles con altos contenidos de ceniza los tiempos de ensayo se reducían considerablemente por la rápida obstrucción del filtro, haciendo que sea inviable la metodología multipunto.

Asimismo, la norma alemana VDI 2066 establece un procedimiento específico para calderas a biomasa en el cual se aconseja el uso de un único punto de muestreo correspondiente al centro de la sección, el cual está asociado a una ubicación de mayor velocidad (Lenz et. al., 2018).

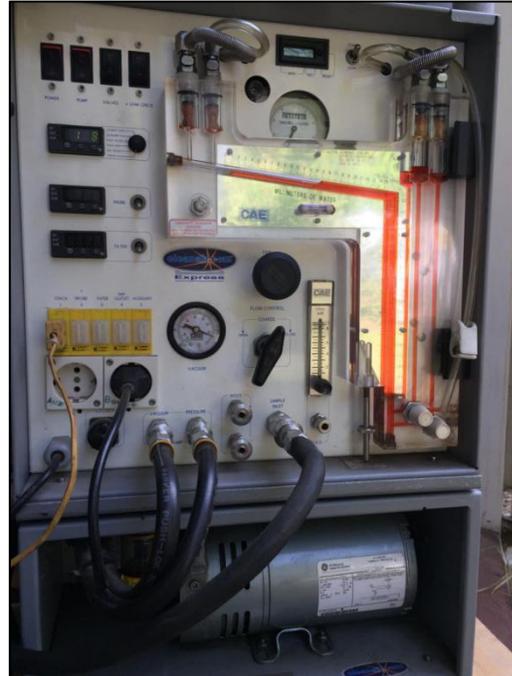
Figura 28: Set de medición en caldera a biomasa: (1) Tubo Pitot, (2) Portafiltro en puerto de muestreo, (3) Línea de inoxidable donde se produce la condensación, (4) Sistema condensador y (5) Cordón umbilical o línea de muestreo.



Figura 29: Analizador de gases de combustión Testo 310



Figura 30: Muestreador isocinético de gases (izquierda) y consola de medición (derecha)



Además, se redujeron los diámetros de las dos chimeneas para aumentar la velocidad del gas y así observar una diferencia de presión significativa en el

manómetro de rama inclinada del tubo Pitot, ya que este es poco sensible a las velocidades que generalmente se desarrollan en estufas y calderas a biomasa (≈ 2 m/s). Las reducciones de diámetro fueron de 6" a 4" en la caldera a chips y de 3" a 2" en la estufa a pellets, aumentando 2,25 veces en ambos casos las velocidades del gas. Esta práctica solución se encuentra dentro de lo enunciado por la normativa alemana VDI 2066 en referencia a las mediciones en calderas a biomasa domésticas (Lenz et. al., 2018).

7.9. Error en el muestreo

Durante cualquier muestreo existen diferentes fuentes de error que influyen de manera directa sobre el valor que se obtiene como resultado final. En este trabajo, se consideraron dos fuentes de error. Por un lado, los errores debidos a la precisión de los instrumentos utilizados, como los manómetros de rama inclinada, las balanzas granatarias y analíticas, el medidor de gas seco y los sensores de temperatura, este valor figura junto al parámetro medido, por ejemplo: CO (± 1 ppm). Además, para obtener el error de un parámetro conseguido mediante la utilización de varios instrumentos es necesario realizar una propagación de errores (Anexo 5), para de esta manera obtener la posible discrepancia (\pm) del valor obtenido con el valor real. Mediante la suma cuadrática de esta cifra y el desvío estándar de los valores obtenidos (cuantificación de la variabilidad de los datos) se cuantificó la dispersión de la variable aleatoria. En otras partes de este trabajo se hace uso de este valor bajo el término "error del muestreo". Los valores medios de cada muestreo más esta dispersión fueron empleados para comparar con los límites establecidos por las normativas.

Por otro lado, se planteó la utilización del error estándar, cociente del desvío estándar de un conjunto de datos dividido por la raíz del número de observaciones de la muestra. A partir de este valor, y en conjunto con el promedio de los datos es posible construir los denominadas intervalos de confianza. Estos nos ofrecen un rango de números que reflejan la incertidumbre en la estimación de un parámetro.

Para este trabajo se optó por usar un intervalo de confianza del 95,4%, valor considerablemente alto sin tener que expandir significativamente el intervalo (media \pm 2 errores estándares).

7.10. Resultados del análisis de las emisiones y la combustión

7.10.1. Pellets (estufa Mocca de origen chino)

El error que figura en las siguientes tablas es la dispersión de la variable aleatoria (suma cuadrática del error del método -propagación de los errores de cada instrumento- y el desvío estándar de las muestras tomadas)

Tabla 11: Emisiones de MPT y CO de estufa a pellets Mocca

Combustible	Emisiones				Muestras tomadas (n)
	Material particulado(mg/Nm3)		CO (\pm 1 ppm)		
	Media	Error	Media	Error	
Pellet fuste	42	\pm 2	144	\pm 10	4
Pellet ramas	61	\pm 20	71	\pm 10	5
Pellet follaje	210	\pm 20	208	\pm 20	4

Tabla 12: Potencia útil de estufa Mocca en base a los diferentes combustibles

Combustible	Potencia útil										
	Eficiencia ($\pm 0,1\%$)	PCS ¹⁹ (kWh/kg)*	PCS (kJ/kg)*	Hidrógeno* (%)	Ceniza+S + Carbono* (%)	O2 + Nitrógeno* (%)	Humedad ($\pm 0,1\%$)	PCI ²⁰ (kJ/kg)*	PCI según se recibe (kJ/kg)	Consumo ($\pm 0,1$ kg/h)	Potencia útil ($\pm 0,5$ kW)**
Pellet fuste	82	5,45	19620	6,59	51,4	42,03	8,4	18188	16660	1,2	4,5
	± 1										
Pellet ramas	83	5,91	21276	6,64	53,0	40,34	9,2	19835	18008	1,2	5
	± 1										
Pellet follaje	82	6,05	21780	6,64	54,1	39,26	9,7	20340	18366	1,1	4,5
	± 1										

*Datos bibliográficos: *Herramientas para negocios sustentables en biomasa forestal Región de Aysen - INFORAysen - INFOR*

** Potencia útil = Eficiencia x Consumo x PCI según se recibe

Tabla 13: Emisión de caudal másico de estufa Mocca para comparación con normativa

Combustible/Potencia	Emisión de MPT (gr/h)		Potencia ($\pm 0,5$ kW)
	Media	Error	
Pellet fuste	2	± 1	4,5
Pellet ramas	3	± 1	5
Pellet follaje	10	± 1	4,5

¹⁹ Poder calorífico superior

²⁰ Poder calorífico inferior

7.10.2. Chips (caldera Hargassner de origen austríaco)

Durante la realización de los ensayos de material particulado en la caldera se observó y determinó que los primeros muestreos fueron realizados de manera incorrecta. Esto fue consecuencia del sellado incorrecto del portafiltro que permitía que una parte del particulado escape a la retención en el filtro (figura 31). Por esta razón, se desestimaron todas las mediciones realizadas previas a dicho hallazgo.

Dicho esto, se tuvieron que eliminar los resultados obtenidos para los chips de fuste y rama ya que no se contaba con más material para hacer los ensayos de manera correcta. Otra fue la situación de los chips de follaje de los cuales existió un sobrante de los primeros ensayos pudiéndose realizar dos muestreos sobre ellos. Cabe aclarar que este combustible es el más conflictivo en cuanto a la calidad, siendo los restantes pertenecientes a las categorías "A" según ISO.

Al igual que en la subsección anterior (7.10.1.) el error utilizado es la dispersión de la variable aleatoria.

Figura 31: Filtro usado con sellado incorrecto (izquierda) y sellado correcto (derecha)

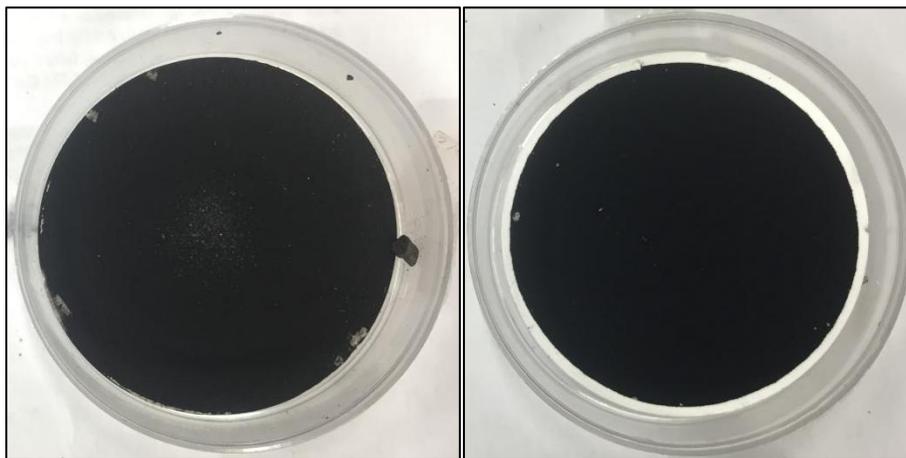


Tabla 14: Emisiones de MPT y CO de caldera Hargassner

Combustible	Emisiones				Muestras tomadas (n)
	Material particulado (mg/Nm ³)		CO (±1 ppm)		
	Media	Error	Media	Error	
Chip fuste ¹³	-	-	6	±1	3
Chip ramas ²¹	-	-	20	±2	4
Chip follaje	49	±1	124	±60	2/6 ²²

Tabla 15: Potencia útil de caldera Hargassner en base a los diferentes combustibles

Combustible	Potencia útil										
	Eficiencia (± 0,1%)	PCS (kWh/kg)*	PCS (kJ/kg)*	Hidrógeno* (%)	Ceniza+S + Carbono* (%)	O ₂ +Nitrógeno* (%)	Humedad (± 0,1%)	PCI (kJ/kg)*	PCI según se recibe (kJ/kg)	Consumo (± 0,1kg/h)	Potencia útil (± 0,5kW)**
Chip fuste	94 ±1	5,45	19620	6,59	51,7	41,75	10,1	18188	16351	11,6	49,5
Chip ramas	93 ±2	5,91	21276	6,64	52,6	40,75	11,4	19834	17573	10,7	49
Chip follaje	92 ±1	6,05	21780	6,64	54,7	38,66	14,8	20340	17329	8,7	38,5
*Datos bibliográficos: <i>Herramientas para negocios sustentables en biomasa forestal Región de Aysen - INFOR</i>											
** Potencia útil = Eficiencia x Consumo x PCI según se recibe											

²¹Los valores obtenidos para la emisión de MP no son reales debido a un error en el ensamblaje del portafiltro.

²² Cantidad de muestras utilizadas para calcular el monóxido de carbono

7.11. Límites de emisión según normativa

A continuación se presentan los límites establecidos por las normativas utilizadas en este trabajo.

Tabla 16: Límite de emisión para estufas a pellets y/o leña según Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile - Año 2014

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

Tabla 17: Límites de emisión y requisitos de eficiencia para estufas a pellet según Reglamento 2015/1185 de la Unión Europea - Año 2015

Reglamento 2015/1185 - Aparatos de calefacción local con la parte frontal cerrada que utilicen madera comprimida en forma de pellets (obligado cumplimiento 01/01/2022)	
Requisitos de diseño ecológico específicos relativos a las emisiones y la eficiencia energética	
MPT	20 mg/Nm ^{3*}
CO	300mg/Nm ^{3*}
Eficiencia	79%
*A condiciones del gas de 273 K, 101.3 kPa y 13% de contenido de O ₂	

Tabla 18: Límites de emisión y requisitos de eficiencia para calderas según Reglamento 2015/1189 de la Unión Europea - Año 2015

Reglamento 2015/1189 - Calderas de combustible sólido de alimentación automática con potencia calorífica nominal > 20 kW (obligado cumplimiento 01/01/2020)	
Requisitos de diseño ecológico específicos relativos a las emisiones y la eficiencia energética	
MPT	40 mg/Nm ³ *
CO	500 mg/Nm ³ *
Eficiencia	77%
*A condiciones del gas de 273 K, 101.3 kPa y 10% de contenido de O ₂	

Tabla 19: Límites de emisión de calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW según la norma europea UNE EN 303-5 - Año 2012

Carga	Combustible	Potencia útil nominal kW	Límites de emisiones								
			CO			OGC			Partículas (polvo)		
			mg/m ³ a 10% O ₂ ^a								
			clase 3	clase 4	clase 5	clase 3	clase 4	clase 5	clase 3 ^b	clase 4	clase 5
manual	biogénico	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fósil	≤ 50	5 000	150	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	100	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	100	125						
automático	biogénico	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fósil	≤ 50	3 000	100	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	80	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	80	125						

Tabla 20: Límites de emisión de MPT para centrales turbovapor según combustible. Resolución 0108/2001 de la Secretaria de Energía y Minería de Argentina

Combustible	mg/Nm³	Corrección de % O₂
FuelOil	140	3
Gas	6	3
Carbón mineral	120	6

8. Análisis de los resultados

8.1. Caracterización de los biocombustibles

Mediante los ensayos de caracterización de los pellets, y teniendo en cuenta que la normativa para uso doméstico de estos es más exigente que la de chips se obtuvieron los siguientes resultados. Los de material de fuste poseen todas las propiedades para pertenecer a la categoría “A1” establecida por ISO 17225-2. A pesar de ello, la durabilidad mecánica obtenida para esta corriente haría que quede por fuera de la categorización establecida por esta normativa. Sin embargo, esta característica está vinculada más al proceso de producción que a la materia prima en sí. Por este motivo, podemos sugerir que haciendo algunos ajustes en la línea de producción, como la humedad del material, la presión de los rodillos, el espesor de la matriz o el enfriamiento en el tamizador se modifique considerablemente este parámetro. Otro fue el resultado de los pellets de ramas que lograron entrar en la categorización bajo la denominación “B”. En este caso, no fue posible obtener una categoría “A1” por el origen de la materia prima, ni tampoco “A2” por su elevado contenido de cenizas; a diferencia de los pellets de fuste, estos obtuvieron una durabilidad mecánica superior. Por último, los pellets de follaje quedaron fuera de la categorización doméstica principalmente por su gran contenido de cenizas, mientras que de acuerdo al resto de sus características podrían haberse clasificado como combustible de grado “B”.

Por su parte, la caracterización de chips determino la etiqueta de calidad correspondiente a cada una de las corrientes analizadas. Los producidos con material de fuste son los que alcanzaron mejor categorización “A1”, seguidos de los chips de ramas “A2”. Estos últimos no lograron entrar a la categoría “A1” por su elevado contenido de cenizas y material fino (<3,15 mm). Los chips de follaje corresponden a la calificación “B1”. Esta última corriente es de gran utilidad para usos domésticos e industriales. Sin embargo, su utilización está sujeta a un previo

análisis elemental (cloro, azufre, etc.) del material para corroborar con máximos recomendados por la normativa.

8.2. Análisis de las emisiones y la combustión

8.2.1. Pellets (estufa Mocca de origen chino)

Con los resultados de la tabla 11 para la emisión de CO (valores corregidos a CNPT²³ y 10% de O₂) y sus correspondientes errores se realizó una comparación con la Resolución Europea 2015/1185 (tabla 17). Los límites de esta normativa también fueron corregidos al 10% de O₂ para mantener un criterio uniforme en todas las comparaciones. Los porcentajes que se observan luego de la mención de cada corriente son con respecto al mejor promedio. Además, con estos mismos valores se construyeron los intervalos de confianza de 95,4% (figura 32). Los puntos que se observan en las figuras son los valores del límite inferior, media y límite superior de los intervalos.

La emisión de CO de los pellets tuvo como menor generador a los de ramas (tabla 21), seguidos por lo de fuste (+90%), y por último los de follaje (+290%). Comparando los resultados con el límite de emisión podemos afirmar que ninguna de las 3 corrientes lo superan.

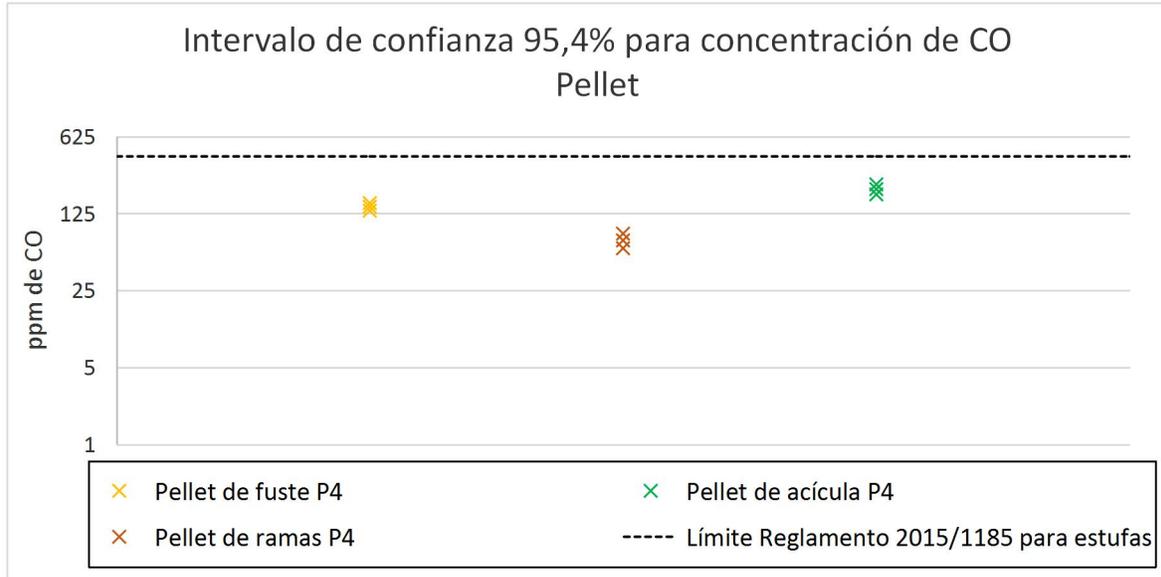
Tabla 21: Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes

CO (ppm)	Media + SC ²⁴	Límite 2015/1185
Pellets fuste P4	150	412,5*
Pellets ramas P4	80	412,5*
Pellets follaje P4	230	412,5*
*Valor obtenido al corregir el límite de 300 mg/Nm ³ al 10% de O ₂		

²³Condiciones normales de presión y temperatura 760 mm de Hg y 0°C

²⁴Suma Cuadrática del error propagado y el desvío estándar del muestreo

Figura 32: Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de monóxido de carbono de pellets

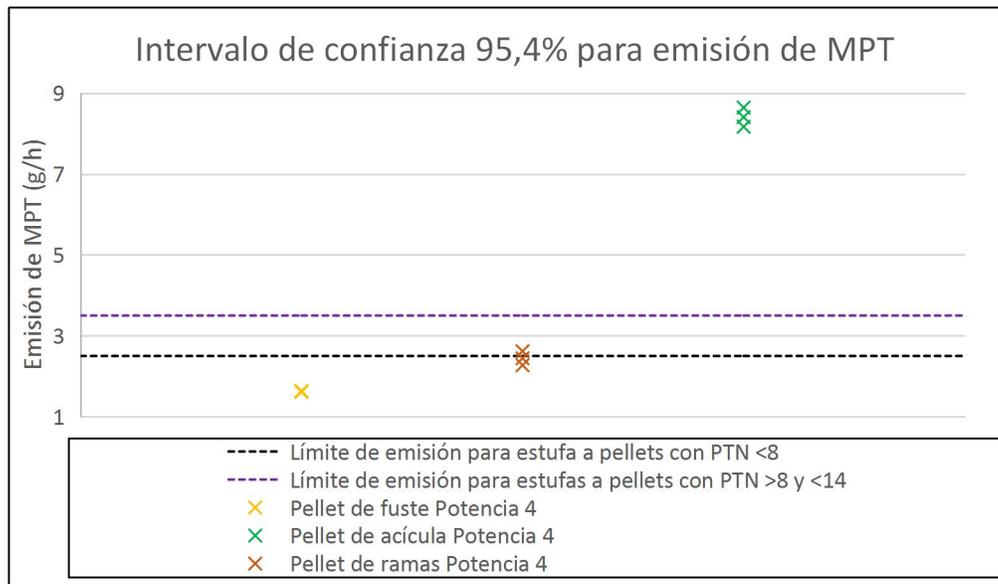


La emisión de material particulado cambia poco con respecto a la de CO (tabla 22), siendo en este caso el pellet de fuste el menor generador, continuando con el de rama (+300%) y cerrando con el de follaje (+900%). En cuanto a los intervalos de confianza construidos (figura 33), podemos asegurar que los de fuste se encuentran por debajo de los límites establecidos por el Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile para esa potencia en particular. Por otro lado, el intervalo de confianza para los pellets de ramas demuestra que estos superan el límite para la potencia suministrada en el ensayo ($\approx 5\text{kW}$), pero no para la potencia nominal de la estufa (10kW); esto mismo sucede con el valor que contempla el error de muestreo (tabla 22). Mientras tanto, los generados con el material de follaje superan ampliamente los dos límites ($>300\%$ respecto al límite).

Tabla 22: Comparación entre límites de emisión de MP con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes. Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile

Emisión (gr/h)	Media + SC	Decreto 39	
		(PTN < 8 kW)	(8 kW < PTN < kW14)
Pellets fuste P4	1	2,5	3,5
Pellets ramas P4	3	2,5	3,5
Pellets follaje P4	9	2,5	3,5

Figura 33: Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de pellets. Normativa chilena

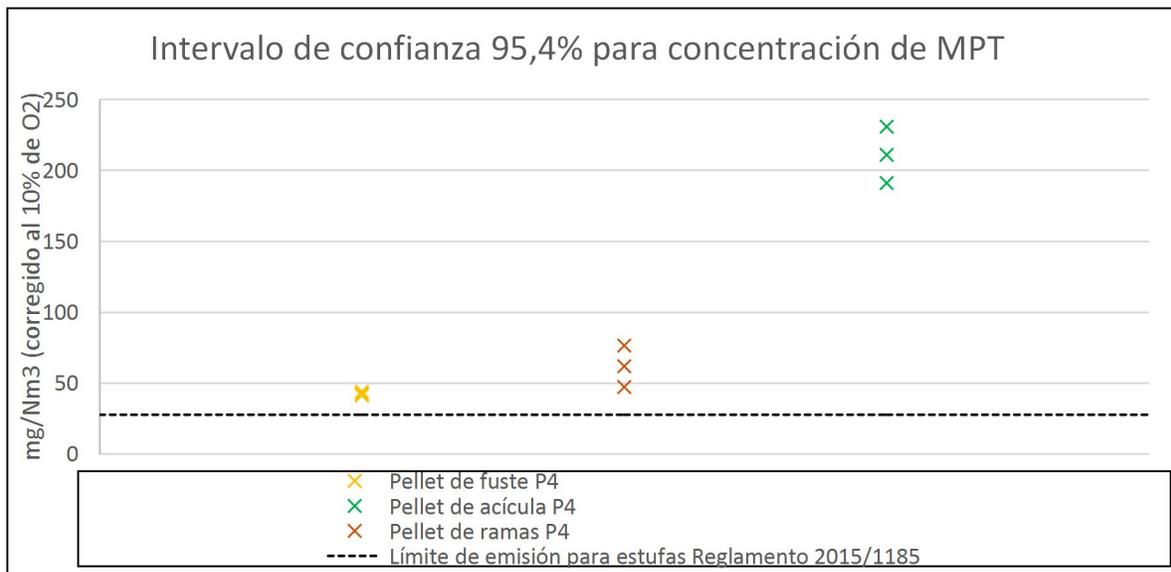


Otro es el panorama si se comparan los valores obtenidos con los límites establecidos por la UE (tabla 23 y figura 34), en este caso todos los valores obtenidos se encuentran por encima del Reglamento 2015/1185, siendo el de follaje nuevamente el que más excede este límite.

Tabla 23: Comparación entre límites de emisión de MP con valores obtenidos para pellets y sus errores correspondientes. Normativa europea

Material particulado (mg/m3)	Media + SC	Límite 2015/1185
Pellets fuste P4	44	27,5*
Pellets ramas P4	80	27,5*
Pellets follaje P4	230	27,5*
*Valor obtenido al corregir el límite de 20 mg/Nm ³ al 10% de O ₂		

Figura 34: Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de pellets. Normativa europea



Respecto a las potencias generadas (tabla 12) podemos concluir que en la estufa, sabiendo que solo se analiza una y la más baja de las potencias disponibles (P4), los pellets de ramas son los que más energía entregan, seguidos por los de fuste (-6%) y por último los de follaje (-12%).

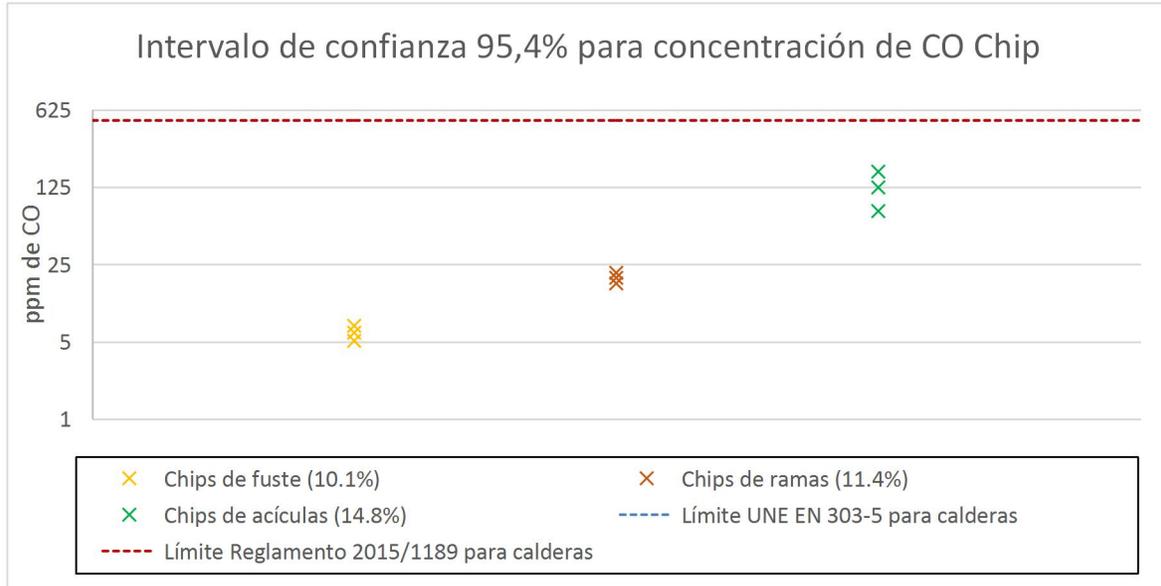
8.2.2. Chips (caldera Hargassner de origen austríaco)

Por su parte, las emisiones de CO generadas por la caldera a partir de la combustión de los chips demuestran estar por debajo de los límites establecidos tanto por la UNE 303-5 y el Reglamento 2015/1189 (tabla 24 y figura 35), siendo el chip de fuste el menor generador, continuado por el de ramas (+100%), y cerrando con el de follaje (+1800%). A diferencia del reglamento 2015/1185 para estufas a pellets, las normativas utilizadas en este apartado son de estricto cumplimiento a partir del año 2020 en Europa.

Tabla 24: Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para chips y sus errores correspondientes

CO (ppm)	Media + SC	Límite UNE EN 303-5	Límite 2015/1189
Chips fuste	10	500	500
Chips ramas	20	500	500
Chips follaje	180	500	500

Figura 35: Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de monóxido de carbono de chips

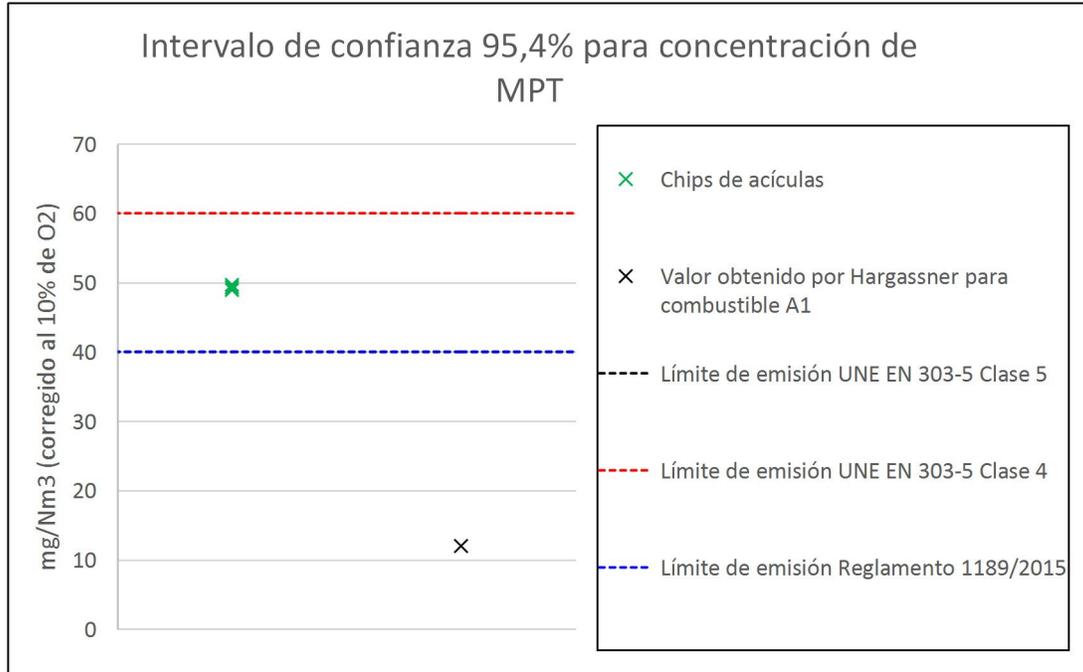


Otra es la situación para la medición de material particulado total en la caldera ya que solo pudieron ser utilizados los resultados correspondientes a los chips de follaje, consiguiendo valores que superaron en un 25% el límite de emisión de la Norma UNE 303-5 para calderas de clase 5 y el Reglamento 2015/1189, y quedando por debajo del límite impuesto para calderas de clase 4 por UNE 303-5 (tabla 25 y figura 36). Además, se sobrepasa ampliamente (+500%) el valor obtenido por Hargassner utilizando combustible con etiqueta de calidad “A1”.

Tabla 25: Comparación entre límites de emisión de CO con valores obtenidos para chips y sus errores correspondientes

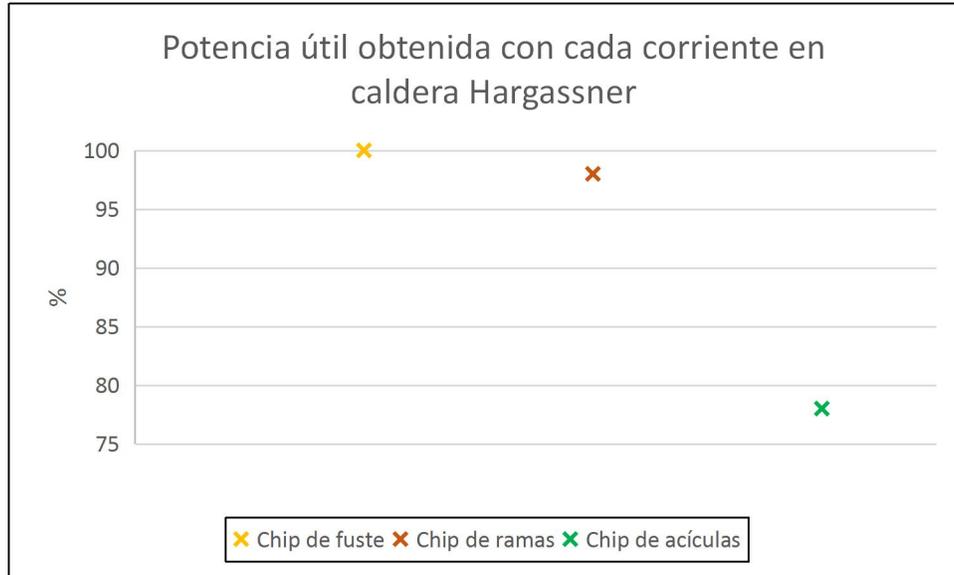
Material particulado (mg/m3)	Media + SC	Límite UNE EN 303-5. Clase 5	Límite UNE EN 303-5. Clase 4	Límite 2015/1189
Chips follaje	50	40	60	40

Figura 36: Intervalo de confianza de 95.4% para la concentración de material particulado total de chips. Normativa Europea



En cuanto al rendimiento de la caldera, tanto el chip de fuste como el de ramas se encuentran muy cerca de la potencia útil nominal de la caldera, mientras que el chip de follaje alcanza un 80% de la misma, mayormente influida por la densidad aparente del combustible y la dificultad que implica para el tornillo alimentador mover este material del silo a la caldera (figura 37).

Figura 37: Potencia útil en la caldera para cada corriente de residuos forestales



8.2.3. Comparación con legislación argentina

Por último, y de manera meramente informativa, ya que son límites para centrales termoeléctricas, se comparan los resultados obtenidos para MPT con la Resolución SEyM 0108/2001, normativa establecida por el Ministerio de Energía y Minería de Argentina (tabla 26 y 27).

Tabla 26: Comparación entre límites de emisión de MPT para centrales termoeléctricas con valores obtenidos y sus errores correspondientes. Corrección al 3% de O2

Resolución SEyM 0108/2001	Media + SC	FuelOil	Gas
Pellets fuste	72	140	6
Pellets ramas	120	140	6
Pellets follaje	360	140	6
Chips follaje	81	140	6

Tabla 27: Comparación entre límites de emisión de MPT para centrales termoeléctricas con valores obtenidos y sus errores correspondientes. Corrección al 6% de O₂

Resolución SEyM 0108/2001	Media + SC	Carbón
Pellets fuste	60	120
Pellets ramas	100	120
Pellets follaje	310	120
Chips follaje	68	120

Más allá de que son límites pertenecientes a otra área de la generación de energía, y que este tipo de instalaciones suelen contar con equipos para el acondicionamiento de los gases de escape, se puede hacer una comparación con los valores propios del trabajo. En primer lugar, todos los resultados están por encima del límite de emisión de los generadores turbovapor alimentados a gas. Luego, tanto para carbón como fuel oil, la única corriente que supera el límite son los pellets de follaje, quedando por debajo la emisión de pellets de fuste y ramas, y los chips de follaje.

9. Conclusiones

9.1. *Observaciones finales*

De los procesos de transformación del residuo forestal destacamos lo siguiente. En el chipeo, hay que tener en cuenta el acopio ordenado de los residuos para maximizar la eficiencia del proceso, y el secado posterior para evitar que el material se degrade una vez finalizada la tarea. En este trabajo se optó por utilizar un secado forzado de los chips, pero es posible realizar un secado natural mediante una adecuada ventilación y buena exposición al sol de la materia prima previa al chipeo durante el verano.

Por otro lado, la pelletización precisó de mayor esfuerzo para lograr obtener los combustibles. En primer lugar, fue necesario moler el material con una granulometría de 4 mm mediante la utilización de un molino martillo y una malla que tamiza el material. Además, se corroboró lo que describe la bibliografía en cuanto a la humedad del material a pelletizar. Este parámetro debe ser controlado para que la materia se pueda aglomerar de manera correcta y así obtener un producto de calidad. Tanto el control de la humedad como la granulometría del material molido, entre otros factores, son etapas muy importantes durante el proceso de pelletizado, siendo la primera una característica con influencia directa sobre la durabilidad mecánica de los pellets, uno de los parámetros más importantes para determinar la calidad de los mismos.

9.2. *Conclusiones del trabajo*

Las 3 variedades de chips de *Pinus ponderosa* analizadas (fuste, ramas y follaje) superaron los límites establecidos en la categorización para uso doméstico según ISO 17225-4. Esto se condice con lo obtenido en otro estudio (Salvaré & Andreassi, 2017). Un dato interesante es que la densidad aparente de chips de ramas fue aproximadamente un 30% superior a la de fuste, con la misma granulometría, haciendo que la densidad energética (cantidad de energía

almacenada por unidad de volumen) fuera de 3896 MJ/m³, mientras que la de fuste fue 2511 MJ/m³. Estos resultados son muy importantes a la hora de pensar en el almacenamiento de los combustibles, ya que la cantidad de energía que se puede almacenar en un mismo espacio es mayor. En cuanto a los chips de follaje, una propiedad a tener en cuenta es su morfología. Esta impide realizar un tamizado del material, haciendo que la densidad del combustible sea muy baja. Asimismo, su manipulación y transporte resulta dificultoso, por lo que no recomendamos su uso doméstico. En resumen, todas las corrientes de chips pueden ser utilizadas para distintos usos térmicos, pero sugerimos hacer un estudio detallado antes de optar por alguna en particular.

En cuanto a los ensayos de emisión de CO en la caldera, las tres corrientes han logrado superar los límites actuales establecidos por normativa europea. No obstante, hay que subrayar que lo generado por los chips de follaje es muy superior a lo obtenido por el material de fuste y ramas. Esto demuestra la importancia de la calidad del combustible para obtener buenos resultados en materia de emisiones gaseosas.

Por su parte, en la medición de MPT como ya se ha comentado, únicamente fue posible utilizar los resultados de los chips de follaje. Además, dado que solo pudieron tomarse dos datos sobre esta corriente, es necesario realizar un estudio más minucioso de este combustible para poder determinar si su uso en la calefacción doméstica pueda ocasionar algún impacto en la calidad de aire, y en consecuencia en la salud de la población aledaña. De los resultados, debemos destacar que a pesar de ser el combustible de peor calidad, el límite para calderas clase 5 no fue ampliamente superado, y el de clase 4 no se superó, demostrando que la tecnología de combustión de la caldera es de muy alta eficiencia.

La caracterización de los pellets ha arrojado que dos de las tres clases producidas poseen las propiedades para ingresar en la categorización comercial establecida por ISO 17225-2. Estos son los fabricados con material de fuste y ramas. Otra es

la situación para los producidos con follaje. Los resultados obtenidos en la caracterización de esta corriente hacen que quede por fuera de la categoría comercial pero, es posible incorporarlo en la categoría "I3" para uso industrial. Esto sería efectivo mediante la implementación de tecnologías para tratamiento de gases, mecanismos de limpieza en parrillas y superficies de transferencia de calor.

En cuanto al análisis de las emisiones, la producción de CO por parte de los pellets, ha arrojado que las tres clases se encuentran por debajo del límite establecido por el Reglamento de la UE 2015/1185. Otra es la situación en la generación de MPT, ya que ninguna de las 3 corrientes lograron alcanzar el valor fijado por esta misma normativa.

Más allá de lo comentado, las conclusiones obtenidas son de gran valor, siendo que la emisión de CO no ha sido superada, y que habría que realizar algunos ajustes para mejorar la emisión de MPT. Además, todo esto se debe analizar teniendo en cuenta que la estufa utilizada pertenece a las más económicas del mercado actual.

Siguiendo en la línea de los pellets, y en relación a los límites de emisión de MPT de Chile, los de fuste son los que mejor se adaptaron a los mismos. Estos, al igual que los pellets de ramas quedaron por debajo del límite establecido para la potencia nominal de la estufa (9 kW). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los resultados son para una potencia menor (5 kW) a la útil nominal de la estufa, por lo que ante un aumento en la entrega de energía estos valores podrían verse alterados. Por su parte, los pellets de follaje no lograron alcanzar ninguno de estos dos valores.

Los límites establecidos por la legislación chilena, y las conclusiones obtenidas a partir de los mismos son de gran interés para este trabajo debido al desarrollo que existe de la bioenergía en este país, sumado a las similitudes climatológicas que existen con nuestra región.

En resumen, los resultados para la estufa ponen de manifiesto que la misma no cumple con altos estándares de calidad si se la compara con los límites futuros de la UE en cuanto a MPT. Pero, la realidad es otra si se observan los límites futuros para CO, o para MPT en Chile. Por último, podemos concluir que los pellets de fuste y ramas son los que mejor comportamiento mostraron en cuanto a las emisiones, y en el caso de los de follaje se debería evitar su uso en dispositivos domésticos en zonas urbanas o con altas densidades de población.

Es importante destacar que estufas con mayor tecnología a la utilizada o adaptadas a estos combustibles pueden arrojar mejores resultados a los obtenidos en este trabajo. Actualmente existe gran variedad de estufas y calderas a biomasa, con diferentes técnicas para mejorar la combustión, precios y orígenes. Por ello, realizar un estudio del mercado en base al presupuesto que se dispone es la mejor vía para obtener el producto adecuado.

A partir del análisis de las materias primas, podemos inferir que las que más se adaptan a este tipo de tecnologías y representan un potencial energético significativo son el fuste y las ramas. Sin embargo, es posible utilizar el follaje mediante su implementación en instalaciones industriales, o bien incorporando una cierta cantidad establecida a las otras materias primas y así conseguir un combustible híbrido o blend.

Comparando tecnologías podemos asegurar que la caldera ofrece una eficiencia de combustión ampliamente superior a la de la estufa, tanto desde el punto de vista energético, como así también desde las emisiones generadas. Sin embargo, esto se ve reflejado en la diferencia de precios (\$/kW) entre equipos como consecuencia de la robustez de un dispositivo frente al otro. Por este motivo, consideramos que la estufa a pellet, siendo una de las marcas más económicas del mercado es de gran utilidad, con buenos rendimientos y no muy alejada de los límites más exigentes de emisión.

A pesar de lo comentado, y en caso de ser posible, sugerimos la compra de estufas y combustibles de mejor calidad.

De esta manera concluimos que, desde un análisis costo-beneficio la estufa a pellet resulta una solución práctica y alcanzable para aquellos hogares que no cuentan con red de gas natural, mientras que la caldera tiene un potencial de aprovechamiento mayor en sitios donde se necesitan cubrir amplias superficies como edificios públicos, y en el caso particular de Bariloche, en infraestructuras destinadas a la actividad turística.

10. Trabajos futuros

A partir de la información obtenida por este informe es posible desarrollar otros trabajos vinculados a la temática, como por ejemplo:

- Simulación de la dispersión de los contaminantes (CO y MPT) desde varias fuentes de emisión con el soporte de un modelo de dispersión atmosférica. Sumando, además, los datos climáticos y de terreno de la zona para estimar las concentraciones que se podrían desarrollar en diferentes sitios donde existe población de riesgo, como pueden ser hospitales y escuelas, y así estudiar potenciales efectos sobre la salud.
- Estudio del potencial de utilización de otras especies de la zona, ya sean nativas o exóticas, arbóreas o arbustivas para su implementación como recursos bioenergéticos.
- Utilización de los residuos forestales de *Pinus ponderosa* en otros equipos de combustión, o bien bajo diferentes situaciones de uso (Ej: cambio de potencias en las estufas).
- Análisis del balance energético y/o financiero de la implementación de la bioenergía como una solución paliativa a la falta de red de gas natural en diferentes ciudades de la región. Como así también un estudio socio-ambiental del impacto generado en la inclusión de este tipo de tecnologías (Estudio de factibilidad).

11. Referencias

Atuesta Boada L.E. & Sierra Vargas. 2015. *Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual.*

Bajano H. 2006. *Guía para los ensayos en Chimeneas.* 2da edición. Grupo Monitoreo Ambiental. CNEA.

Camuzzi Gas. Tarifas vigentes. Recuperado el 28/02/19 de:
<http://www.camuzzigas.com.ar/tarifas-vigentes>

Carrizo S., Carre M. N. & J.I. Michaux. 2014. Vulnerabilidad energética en la metrópoli de Buenos Aires. *Territorios*, 30, pp. 127-146.

Celis J.E., Morales J.R., Zaror C.A. & O.F. Carvacho. 2007. *Contaminación del aire atmosférico por Material Particulado en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile).* *Información Tecnológica*, Vol. 18(3), pág. 49-58.

Cerdá E., Caparrós Gass A. & P. Ovando Pol. 2008. *Bioenergía en la Unión Europea.* *Ekonomiaz* N° 67, 1.º trimestre.

Cerdá, E. 2012. *Energía a partir de biomasa.* *Revista ICE*, 83, 117-140.

Diez J.P., Varela S.A., Martínez Meier A., Caballé G., Claps L., Andreassi L., & F. Salvaré. 2017. *Aprovechando residuos forestales: Una alternativa de manejo integral de plantaciones de pino ponderosa en la cuenca de arroyo del medio.* *Presencia* N°68.

Escribano G. 2006. Seguridad Energética: concepto, escenarios e implicaciones para España y la UE. Real Instituto Elcano de Estudios Internacionales y Estratégicos.

García-Ubaque C.A., Vaca-Bohórquez M.L. & G.F. Talero. 2013. *Aprovechamiento de biomasa peletizada en el sector ladrillero en Bogotá-Colombia: Análisis Energético y Ambiental.*

Gil S. & J. Deferrari. 1999. *Modelo de predicción del consumo de gas natural de la República Argentina*. ENARGAS - Ente Nacional Regulador del Gas Argentina.

González A.D., Crivelli E. & S. Gortari. 2006. *Eficiencia en el uso del gas natural en viviendas unifamiliares de la ciudad de Bariloche*. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). 2014. *Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2014. *Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas*. Recuperado el 28/02/19 de: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PCI_Combustibles_Carbura ntes_final_valores_Update_2014_0830376a.xlsx

Infor. *Herramientas para negocios sustentables en biomasa forestal Región de Aysén*.

Labandeira X., Linares P., & K. Wurzburg. 2012. *Energías renovables y cambio climático*.

Lenz V., Thran D., & D. Pfeiffer. 2018. *Methods for Measuring Emissions of Particulate Matter from Solid Biomass Combustion*. Series of funding programme "Biomass energy use".

Linea Sur Noticias. Mayo de 2018. *Se presentó el Plan Calor Garrafa Social*. Recuperado el 08/03/19 de: <http://lineasurnoticias.com.ar/se-presento-el-plan-calor-garrafa-social/>

Loguercio G.A., Jovanoski A., Molina J.C. & P. Pantaenius. 2008. *Residuos de biomasa de forestaciones y aserraderos de la región andina de las provincias de Neuquén y Chubut. Evaluación preliminar de oferta.*

Maldonado Alcaino A.K., Cáceres Lillo D. & M. Acuña Briones. 2017. *Vulnerabilidad de los “peligros del lugar” en Coyhaique, Chile del 2009 al 2015.*

Mattes Fernández H., Fontana V., Álvarez Mansilla H. & G. Soto. 2010. *Primera cita de Sphaeropsis sapinea en Pinus ponderosa en Neuquén, Argentina.* Quebracho Vol. 18 (1,2): 120-125.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2017. *KIT EDUCATIVO: Una exploración sobre la energía derivada de biomasa.* Material de apoyo docente de “Promoción de energía derivada de biomasa (PROBIOMASA)”.

Organización Mundial de la Salud. Departamento de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud. 2011. *Información básica sobre la contaminación atmosférica urbana.* Recuperado el 30/03/20 de: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_informati on/es/

Organización Panamericana de la Salud. 2017. *Contaminación del aire ambiental.* Recuperado el 30/03/20 de: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918&Itemid=42246&lang=es

Ortíz L., Tejada A., Vázquez A. & G. Piñeiro Veiras. 2003. *Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados.* Revista CIS-Madera.

Resolución 2019/2582 (RSP). Parlamento Europeo. *Resolución del parlamento Europeo, de 14 de marzo de 2019, sobre cambio climático - una visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra de conformidad con el acuerdo de París.*

Estrasburgo. 14 de marzo de 2019. Extraído el 26/06/19 de:
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2019-0217_ES.html

Paredes Sánchez J. 2015. *Investigación en materia de bioenergía para la industria energética*. Opción, vol. 31, núm. 4, 2015, pp. 709-716.

Prüss-Ustün. A., Wolf J., Corvalán C., Bos R. & M. Neira. Organización Mundial de la Salud. 2016. *Preventing Disease Through Healthy Environments. A global assessment of the burden of disease from environmental risks*.

Ramas R., Borjabad E., Mediavilla I., Rodríguez-Maroto J., Sanz D. & E. Rojas. 2015. *Control de emisiones de partículas en equipos de combustión de biomasa*. Revista Técnica de Medio Ambiente.

Revista Energiza. *Las calderas y estufas de biomasa instaladas en Europa han ahorrado cerca de 98.000 millones de litros de gasóleo en los últimos años*. Recuperado el 08/03/19 de:
http://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=1139:las-calderas-y-estufas-de-biomasa-instaladas-en-europa-han-ahorrado-cerca-de-98-000-millones-de-litros-de-gas%C3%B3leo-en-los-%C3%BAltimos-a%C3%B1os

Salvare F. & L. Andreassi. 2017. *Biomasa Forestal: Caldera a chips. Energía con biomasa forestal*. Patagonia Forestal (Número 1).

Secretaría de Energía de la República Argentina. *Tabla de conversiones energéticas*. Recuperado el 28/02/19 de:
<http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3622>

Uasuf A. & Hilbert J. 2012. *El uso de la biomasa de Origen Forestal con destino a bioenergía en la Argentina*. Informes técnicos bioenergía 2012, Año 1 N°2. Ediciones INTA Publicaciones periódicas. Instituto de Ingeniería Rural.

Velázquez Martí B., 2006. *Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética*. Ecosistemas 15(1): 77-86.

Zapata Saad A.J. 2016. *Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirólisis*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

12. Anexo

12.1. Mediciones de la velocidad de flujo en estufa y caldera

Para poder fabricar las boquillas para la sonda del muestreador isocinético fue necesario determinar la velocidad de los gases en las chimeneas de la estufa y la caldera a evaluar. Así, el día 04/07/19 se realizó la medición de la velocidad de los gases de la caldera mediante un anemómetro Testo modelo probe 405i. Los resultados obtenidos fueron comparables con los suministrados por los fabricantes de las calderas. La extracción del dato se realizó sin combustión de biomasa debido al rango de temperatura en el cual trabaja el anemómetro, pero se utilizaron los forzadores de tiro a máxima potencia para simular una situación típica de funcionamiento a plena carga.

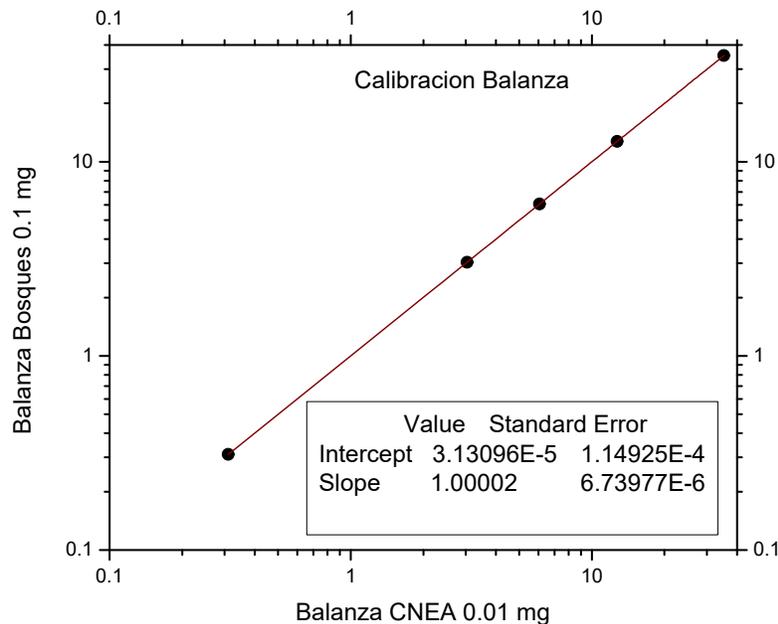
De la misma manera, el día 09/08/19 se determinó la velocidad de los gases en la estufa. Nuevamente las mediciones se vieron limitadas por la temperatura de trabajo del anemómetro (-20 a 60 °C), por lo que se decidió primero realizar las mediciones en la chimenea hasta que las temperatura superará este rango, y luego se prosiguió midiendo la entrada de aire de la estufa a la cual se le realizó una extensión para poder llevar adelante el ensayo. Los resultados obtenidos a partir de la entrada de aire se corrigieron con los datos de la densidad del aire y el diámetro de los conductos; de esta manera se obtuvieron para obtener los valores de la velocidad en el escape de gases de la estufa. Este ensayo se realizó bajo dos programas de potencia diferentes para observar si existía alguna diferencia significativa.

Equipo	Velocidad (m/s)
Caldera Hargassner	1,2
Estufa Mocca	0,5

12.2. Calibración de la balanza analítica

Con el objetivo de obtener resultados válidos de la balanza perteneciente a los laboratorios de bioenergía de CIEFAP, la cual posee una precisión de 0,1 mg, se realizó una curva de calibración donde se la contrasto con una balanza del departamento de Seguridad Nuclear de CNEA a partir del pesaje de objetos con pesos que cubrían lo rangos de medición de esta última. Para esa tarea se utilizó un software graficador y se obtuvo un error estándar menor a 7×10^{-6} , por lo que se considero que la balanza disponible servía para ejecutar el muestreo de material particulado.

Figura 38: Curva de calibración de balanzas analíticas



12.3. Comparación entre métodos para la medición de la velocidad del flujo

Para poder validar el método mediante tubo Pitot, este fue comparado con un anemómetro de hilo caliente (Testo probe 405i) bajo las condiciones donde este último puede obtener datos válidos. Para esto se colocaron los ventiladores del tiro forzado de la caldera Hargassner al 100% de su funcionamiento y se compararon las velocidades mediante ambos métodos en varios puntos de un plano perpendicular a la dirección del flujo.

12.4. Certificado de calibración Testo 310

Kalibrier-Protokoll		We measure it. 		
Certificate of conformity • Protocole d'étalonnage Certificato di taratura • Informe de calibración				
Gerät / Module type / Type de modèle / Prodotto / Modelo:		T310		
Seriennummer / Serial No. / No. de série / No. Serie strumento / n° de serie:		42841734		
Temperaturmessung Temperature measurement Mesure de température Misura della temperatura Medición de temperatura	Sollwert Reference Référence Valore campione Referencia	Istwert Actual value Valeur effective Valore misurato Valor medido	Zulässige Abweichung Permissible deviation Différence admissible Scostamento ammesso Desviación permitida	
Verbrennungslufttemp./ Ambient air temp. Température d'air de combustion Temperatura aria comburente Temperatura ambiente	80.0 °C	79.9 °C	± 1.0 °C	
Abgastemperatur / Flue gas temperature Température des fumées Temperatura fumi Temperatura gases	180.0 °C	179.9 °C	± 1.0 °C	
Zug-/Druckmessung Draught/pressure measurement Mesure de tirage/de pression Misura della pressione/ tiraggio Medición de trío/ presión	2.00 hPa	2.01 hPa	± 0.03 hPa	
Gasmeßwerte / Gas values / Valeurs de gaz mesurées / Parametri di misura dei gas / Gases patrón				
Reg. Nr. Reg. No. Reg. No. Num. reg. n° certi	Gas Gas Gaz Gas Gas	Sollwert Reference Référence Valore campione Referencia	Istwert Actual value Valeur effective Valore misurato Valor medido	zulässige Abweichung Permissible deviation Différence admissible Scostamento ammesso Desviación permitida
07166502	O2	0.0 %	0.0 %	± 0.2 %
07075300	O2	2.5 %	2.5 %	± 0.2 %
07166502	CO	100 ppm	101 ppm	± 20 ppm
07075300	CO	699 ppm	691 ppm	± 35 ppm

12.5. Propagación de errores

Propagación para obtener el error del muestreo de MP

V_m = Volumen muestreado por el medidor de gas seco

P_b = Presión barométrica extraída del Servicio Meteorológico Nacional

DH = Caída de presión en la placa de orificio (manómetro de rama inclinada)

T_m = Temperatura del gas

M_{co} = Masa de material particulado capturado por el filtro

V = Volumen de gas muestreado

C_o = Concentración de material particulado

O_m = Oxígeno medido

O_x = Oxígeno corregido

Los valores Δ son los errores propios de cada instrumento de medición.

Los valores asumidos para cada variable son típicos de los muestreos.

$$V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m] = 0.386 V_m \frac{(P_b + \frac{D_H}{13.6})}{T_m + 273}$$

$$\Delta V_m = 0.01$$

$$\Delta P_b = 0.1$$

$$\Delta D_H = 0.2$$

$$\Delta T_m = 1$$

$$\partial_{V_m} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m]$$

$$\partial_{P_b} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m]$$

$$\partial_{D_H} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m]$$

$$\partial_{T_m} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m]$$

$$\left((\partial_{V_m} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m] \cdot \Delta V_m)^2 + (\partial_{P_b} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m] \cdot \Delta P_b)^2 + \right. \\ \left. (\partial_{D_H} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m] \cdot \Delta D_H)^2 + (\partial_{T_m} V_{mc} [V_m, P_b, D_H, T_m] \cdot \Delta T_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{0.386 (0.0735294 D_H + P_b) V_m}{273 + T_m}$$

$$0.01$$

$$0.1$$

$$0.2$$

$$1$$

$$\frac{0.386 (0.0735294 D_H + P_b)}{273 + T_m}$$

$$\frac{0.386 V_m}{273 + T_m}$$

$$\frac{0.0283824 V_m}{273 + T_m}$$

$$\frac{0.386 (0.0735294 D_H + P_b) V_m}{(273 + T_m)^2}$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.0000148996 (0.0735294 D_H + P_b)^2}{(273 + T_m)^2} + \right. \\ \left. \frac{(0.148996 (0.0735294 D_H + P_b)^2 V_m^2)}{(273 + T_m)^4} + \frac{0.00152218 V_m^2}{(273 + T_m)^2} \right)}$$

$$\sqrt{\left(\frac{0.0000148996 (0.07352941176470588 \cdot 3 + 780)^2}{(273 + 110)^2} + \right. \\ \left. \frac{0.148996000000000002 (0.07352941176470588 \cdot 3 + 780)^2 \cdot .5^2}{(273 + 110)^4} + \right. \\ \left. \frac{0.0015221823183391007 \cdot .5^2}{(273 + 110)^2} \right)}$$

$$0.00793021$$

$$\begin{aligned} \Delta Mco &= 0.0001 \\ \Delta V &= 0.008 \\ Co [Mco, V] &= \frac{Mco}{V} \\ \frac{\partial_{Mco} Co [Mco, V]}{\partial_V Co [Mco, V]} & \\ \left((\partial_{Mco} Co [Mco, V] \cdot \Delta Mco)^2 + (\partial_V Co [Mco, V] \cdot \Delta V)^2 \right)^{\frac{1}{2}} & \\ 0.0001 & \\ 0.008 & \\ \frac{Mco}{V} & \\ \frac{1}{V} & \\ -\frac{Mco}{V^2} & \\ \sqrt{\frac{0.000064 Mco^2}{V^4} + \frac{1 \cdot 10^{-8}}{V^2}} & \\ \sqrt{\frac{0.000064 \cdot 0.02^2}{500^4} + \frac{1 \cdot 10^{-8} \cdot (-8)}{500^2}} & \\ 2.00001 \times 10^{-7} & \\ \Delta Con &= 2.0000102399737857 \cdot 10^{-7} \\ \Delta Om &= 0.2 \\ Correc [Con, Om] &= Con \cdot \frac{20.9 - Om}{20.9 - Om} \\ \frac{\partial_{Con} Correc [Con, Om]}{\partial_{Om} Correc [Con, Om]} & \\ \left((\partial_{Con} Correc [Con, Om] \cdot \Delta Con)^2 + (\partial_{Om} Correc [Con, Om] \cdot \Delta Om)^2 \right)^{\frac{1}{2}} & \\ 2.00001 \times 10^{-7} & \\ 0.2 & \\ \frac{Con (20.9 - Om)}{20.9 - Om} & \\ \frac{20.9 - Om}{20.9 - Om} & \\ \frac{Con (20.9 - Om)}{(20.9 - Om)^2} & \\ \sqrt{\left(\frac{0.04 Con^2 (20.9 - Om)^2}{(20.9 - Om)^4} + \frac{4.00004 \times 10^{-14} (20.9 - Om)^2}{(20.9 - Om)^2} \right)} & \\ \sqrt{\left(\frac{0.040000000000000001 \cdot 20^2 (20.9 - 13)^2}{(20.9 - 7)^4} + \frac{4.0000409599999996 \cdot 10^{-14} (20.9 - 13)^2}{(20.9 - 7)^2} \right)} & \\ 0.163553 & \\ \frac{20 (20.9 - 13)}{20.9 - 7} & \\ 11.3669 & \end{aligned}$$