

Evaluar y comparar el biocombustible leña del género Pinus con otras especies locales, en el valle superior de El Manso (Río Negro).

Trabajo Final Integrador (TFI)

Requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

SEDE ANDINA

ESCUELA DE PRODUCCIÓN, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

Ingeniería Ambiental

Alumno: Orrego, Romina Silvana

Información general

Título: Evaluar y comparar el biocombustible leña del género Pinus y otras especies locales, en el valle superior de El Manso (Río Negro)

Alumno: Orrego, Romina Silvana

Carrera: Ingeniería Ambiental

Director/ra: Fernando Salvaré

Co-Director/a: Georgina De Micco

Lugar de trabajo: - Paraje Rural el Manso Superior

- CIEFAP delegación de Bariloche
- Centro Atómico Bariloche.

Índice de Contenidos

Información general.....	1
1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	7
3. Antecedentes y Justificación.....	9
4. Objetivos.....	12
4.1. Objetivo General.....	12
4.2. Objetivos Específicos.....	12
5. Hipótesis.....	13
6. Metodología.....	13
6.1. Área de estudio.....	13
6.1.1. Descripción General.....	13
6.1.2. Vegetación Natural.....	15
6.2. Composición de la biomasa.....	16
6.3. Ensayos de combustión.....	18
6.4. Caracterización de los biocombustibles.....	26
6.4.1. Determinación del contenido de humedad.....	26
6.4.2. Densidad básica.....	27
6.4.3. Determinación del contenido de cenizas.....	28
6.4.4. Determinación del Poder Calorífico.....	30
6.4.5. Eficiencia de combustión.....	30
6.4.5. Ensayos de termogravimetría (DTA/TG).....	32
6.4.6. Ensayos de Espectroscopía Infrarrojo (FTIR).....	32
6.4.7. Difracción de Rayos X (DRX).....	33
6.4.8. Determinación de volátiles: análisis de gases de pirólisis por cromatografía.....	35
6.4.9. Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (SEM-EDS).....	36
7. Límites de emisión. Normativa.....	37
8. Errores.....	39
9. Resultados y Análisis.....	40
10. Discusión.....	57
11. Conclusiones.....	60
12. Presupuesto del proyecto.....	62
13. Análisis económico.....	62
14. Referencias.....	63
15. Anexo I.....	67
16. Anexo II.....	71
17. Anexo III.....	72
18. Anexo IV.....	74

Índice General de imágenes

Imagen 1: Foto satelital distancia entre S.C. de Bariloche y El Manso.....	12
Imagen 2 : Bosque de Nothofagus, Austrocedrus Chilensis y Maytenus Boaria. El Manso Superior.....	14
Imagen 3: Esquema interno de la estufa Bosca.....	17
Imagen 4: Sistema de construcción recomendada por el método CH-5G.....	18
Imagen 5: Sistema de construcción según método CH-5G.....	19
Imagen 6: Material leñoso apilado.....	20
Imagen 7: Inicio del fuego. Secado entre los 100 y 150°C.....	22
Imagen 8: Pirólisis, liberación de materia volátil, 250°C.....	23
Imagen 9: Formación de carbón sólido más ceniza.....	23
Imagen 10: Determinación de humedad por xilohigrómetro.....	24
Imagen 11: Determinación de humedad mediante estufa.....	25
Imagen 12: Determinación de la densidad del combustible a través del método de Arquímedes.....	26
Imagen 13: Determinación de contenido de cenizas. Molienda, tamizado y calcinado en mufla del material leñoso.....	27
Imagen 14. Técnicas analíticas aplicadas.....	30
Imagen 15: Pastillas de BrK y con las muestras a analizar. Espectrofotómetro FT-NIR Perkin Elmer Spectrum400.....	31
Imagen 16: Trayectoria del haz incidente y del haz difractado.....	32
Imagen 17: Equipo de difracción de Rayos X para la determinación de fases cristalinas.....	32
Imagen 18: Esquema de construcción para la determinación de volátiles.....	33
Imagen 19: Char obtenido luego de la pirólisis.....	33
Imagen 20: Equipos de SEM.....	34
Imagen 21: Gráfica de velocidad de combustión promedio de cada una de las especies en estudio. Las barras indican el desvío estándar.....	38
Imagen 22: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 8 y 16% de humedad con un promedio de las temperaturas de gases.....	39
Imagen 23: a.)Pino ponderosa seco (izquierda), b)Pino ponderosa húmedo(derecha).....	40
Imagen 24: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de precalentado (10-12 min desde el encendido).....	40
Imagen 25: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de mayor temperatura (a los 35-40 min desde el encendido).....	41
Imagen 26: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de mayor temperatura (a los 55-60 min desde el encendido).....	41
Imagen 27: Temperatura de gases de cada una de las especies durante la combustión.....	42
Imagen 28: Eficiencia de las diferentes especies en estudio desde los 20 a los 40 min.....	43
Imagen 29: Difractograma de Rayos X de biomasa de distintas especies en estudio.....	46
Imagen 30: Espectro infrarrojo de pino ponderosa.....	47
Imagen 31: Espectro infrarrojo de las biomásas de Pino P, Ñire, Sauce, Coihue y Radal.....	48
Imagen 32: Espectro infrarrojo de las cenizas puras de Pino P, Ñire, Sauce, Coihue y Radal.....	48
Imagen 33: Imagen de microscopía SEM de muestras de todas las especies en estudio.....	50
Imagen 34: Gráfico de composición elemental de las Cenizas de las biomásas obtenidas por SEM -EDS...	

Imagen 35: Gráfico de composición elemental del char de las biomásas obtenidas por SEM -EDS.....	52
Imagen 36: Área de CO ₂ de cada especie.....	53
Imagen 37: Área de CO de cada especie.....	53
Imagen 38: Área de CH ₄ de cada especie.....	54
Imagen 39: Área de H ₂ de cada especie.....	54
Imagen 40: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 8 y 16% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	64
Imagen 41: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Ñire entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	64
Imagen 42: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Coihue entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	65
Imagen 43: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Sauce entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	65
Imagen 44: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Sauce entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	66
Imagen 45: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 30 y 40% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.....	66
Imagen 46: Gráficas DTA/TG de todas las biomásas de estudio.....	67
Imagen 47: Difractograma de Rayos X de ceniza de Coihue.....	68
Imagen 48: Difractograma de Rayos X de ceniza de Ñire.....	68
Imagen 49: Difractograma de Rayos X de ceniza de ponderosa.....	69
Imagen 50: Difractograma de Rayos X de ceniza de Sauce.....	69
Imagen 51: Difractograma de Rayos X de ceniza de Radal.....	70
Imágenes 52: Imágen de ceniza de pino ponderosa a 50µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).....	70
Imágenes 53: Imágen de ceniza de Ñire a 10µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).....	71
Imágenes 54: Imágen de ceniza de Coihue a 50µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).....	71
Imagen 55: Imágen de ceniza de Radal a 50µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).....	71
Imágenes 56: Imágen de ceniza de Sauce a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 4).....	72
Imagen 57: Imagen de Char de pino ponderosa a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).....	72
Imagen 58: Imagen de Char de Coihue a 500µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).....	72
Imagen 59: Imagen de Char de Ñire a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 3).....	73
Imagen 60: Imagen de Char de Radal a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 3).....	73
Imagen 61: Imagen de Char de Sauce a 500µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).....	73

Índice General de tablas

Tabla 1: Categorías de velocidad de quemado.....	23
Tabla 2: Requisitos de diseño ecológico de aparatos de calefacción local de combustible sólido de la norma Desing 2022 y Reglamento UE 2015/1185.....	38
Tabla 3: Límite de emisión para estufas a pellets y/o leña.....	38
Tabla 4: Humedad, contenido de cenizas, densidad y volátiles de cada una de las muestras analizadas con su correspondiente desvío estándar.....	46
Tabla 5: PCS y PCI calculado en base a la ecuación 2 de cada una de las muestras analizadas.....	46
Tabla 7: Asignación de bandas características para los espectros de infrarrojo de las muestras analizadas.....	49
Tabla 8: Composición elemental de las cenizas y del char de cada una de las muestras de biomasa.....	53
Tabla 9: Datos de PCS (Kcal/m ³) y densidad (Kcal/Kg) de especies regionales obtenidas de diversos informes.....	59
Tabla 10. Presupuesto tentativo final.....	62

Índice General de ecuaciones

Ecuación 1: Velocidad de quemado según método CH-28.....	21
Ecuación 2: Cálculo de humedad, según ISO 18134-2.....	25
Ecuación 3: Densidad básica.....	26
Ecuación 4: Cálculo de ceniza, según ISO 18122.....	27
Ecuación 5: Expresión Poder calorífico inferior (PCI).....	28
Ecuación 6: Expresión Poder calorífico inferior (PCI) en base seca y material seco.....	28
Ecuación 7: eficiencia de combustión.....	29
Ecuación 8: Fórmula de Siegert.....	29
Ecuación 9: Ley de Bragg para DRX.....	32
Ecuación 10: Porcentaje de volátiles por pirólisis.....	33
Ecuación 11: Error estándar.....	37

1. Resumen

La Biomasa se considera una fuente de energía limpia por su papel en la lucha contra el cambio climático. El uso de los recursos biomásicos puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal. Sin embargo, en algunas ciudades de Chile la calefacción a leña es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica debido a la combustión de leña no certificada.

En las zonas rurales de la cordillera Argentina, el consumo de leña está profundamente arraigado en las tradiciones y la cultura local. Tal es el caso del paraje rural El manso, el cual se estudiará en el presente trabajo.

La insuficiente provisión de gas natural de red (no subsidiado) y la abundancia de la biomasa forestal contribuyen a sostener el elevado consumo. Así como también el clima, la altitud, la duración del invierno y las estaciones de lluvias hacen que sea sumamente necesario contar con un sistema de calefacción.

El aumento del consumo de leña para calefacción empuja el uso no sostenible de los bosques existentes en la periferia de las ciudades. Por ello considerar alternativas, tales como aumentar la utilización de leña proveniente de plantaciones comerciales de género *Pinus*, ayudará a disminuir la presión sobre los mismos. Estas especies son una fuente inagotable de madera, rápido crecimiento y de otros derivados como el papel y la resina de donde se obtienen una serie de subproductos de uso doméstico necesarios para la vida moderna.

El presente proyecto tiene como objetivo estudiar y comparar el comportamiento de la leña del género *Pinus*, ampliamente disponible en la región de la Patagonia Andina, frente a las especies forestales locales, tales como: *Nothofagus*, *Lomatia* y *Salix pp*, utilizadas para calefacción hogareña. La valorización de la biomasa del género *Pinus* incentivará su uso y disminuirá la presión sobre las masas de bosque nativo. Dentro de los objetivos específicos se recopila normativa nacional (IRAM) e internacional (ISO, CH, UNE-EN) sobre emisiones de equipos de combustión de biomasa, se determina las propiedades físico químicas por medio de análisis de termogravimetría, contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles, espectroscopia infrarroja y energéticas (PCS e PCI), estableciendo comparaciones entre especies y evaluando su comportamiento.

El trabajo se divide en dos grandes secciones: primero la etapa de los ensayos de combustión y por otro lado la etapa de caracterización de las biomasas. Dentro de la metodología se implementan técnicas derivadas de la normativa chilena tales como el **Método CH-5G**, el cual establece la determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución. Otra de las técnicas es el **Método CH-28**: En dónde se miden las emisiones del material particulado de un calefactor a leña, el cual quema un combustible en un contenedor de prueba, manteniendo reguladas las condiciones preestablecidas.

Para el caso de la segunda etapa relacionada con la caracterización se implementan técnicas como el TG-DTA (Termogravimetría y Análisis Térmico Diferencial) y determinación de volátiles por cromatografía gaseosa para conocer el comportamiento térmico de las especies en diferentes atmósferas y la composición de las sustancias liberadas en los calentamientos.. En cuanto al análisis químico, estructural y morfológico, se trabaja con imágenes de SEM-EDS (Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva de rayos X), FTIR (Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier) y DRX (Difracción de Rayos X).

Dentro de los resultados se obtiene que en el caso de la leña de ponderosa húmeda los valores de emisión dieron más altos y el periodo de combustión se extendió. Todas las especies obtuvieron resultados similares antes las mismas condiciones de secado. Por lo tanto, la leña de Pino se comporta de forma similar a las provenientes de las especies nativas ensayadas, pudiendo utilizarse como fuente energética poco contaminante.

El SEM-EDS de la ceniza de estas biomásas muestra la presencia principalmente de calcio, y en menor porcentaje magnesio, potasio, sodio y aluminio. Además se detecta fósforo, azufre, silicio y oxígeno. No se observan diferencias sustanciales en las composiciones de las diferentes cenizas. La ceniza de ñire contiene menor cantidad de minoritarios (solo Mg y Ca). Hasta 550°C la ceniza de biomasa está principalmente compuesta de carbonatos; sin embargo, cuando se alcanzan temperaturas más altas estos carbonatos tienden a descomponerse a óxidos emitiendo dióxido de carbono y estos óxidos pueden reaccionar para formar silicatos.

En el char se identificaron los mismos elementos, sin embargo las concentraciones son mucho menores debido al alto contenido de carbono que en algunos casos no permite detectar los elementos minoritarios por esta técnica (cuando las concentraciones son menores al 0.5%). El carbono es el componente principal de la biomasa leñosa, el que mediante su oxidación libera energía, igual que el hidrógeno. En cambio, el oxígeno se encuentra oxidando de forma parcial a los otros dos elementos, contribuyendo a este proceso durante la transformación termoquímica.

2. Introducción

Según el último reporte de la Agencia de Energía Internacional (IEA) la matriz energética mundial depende en más de un 80 % de combustibles fósiles (IEA, 2020a). Las fuentes renovables de energía aún tienen baja participación, siendo la biomasa la de mayor aporte (cerca del 12 % del suministro de energía primaria mundial), implicando el 70 % de la contribución desde fuentes renovables (WBA, 2019). El 90 % del total de bioenergía utilizada a nivel mundial proviene de biomasa sólida (IEA, 2020b), siendo los recursos más utilizados: leña (67 %), carbón vegetal (7 %) y residuos agrícolas y pecuarios (7 %) (WBA, 2019). Según el informe del IPCC del 2023, la quema de combustibles fósiles y el uso desigual e insostenible de la energía y las tierras durante más de un siglo han provocado un calentamiento global de 1,1 °C por encima de los niveles preindustriales. Los expertos sobre el cambio climático,

advierten que el calentamiento global está en camino a superar el límite acordado de 1,5°C en el 2018 (IPCC, 2018). Las emisiones deberían haber disminuido y será necesario reducirlas casi a la mitad de aquí a 2030 (IPCC, 2023), para ello es preciso lograr reducciones drásticas, rápidas y sostenidas de las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los sectores a través de medidas para mitigar esta problemática.

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de cítricos, caña de azúcar, maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el uso del fuego (FOCER, 2002). Por otro lado ofrece la posibilidad de un abastecimiento energético con recursos naturales autóctonos, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles importados. Es, además, una alternativa para el manejo de residuos y facilita el desarrollo económico local (Ministerio de Energía de Chile, 2021). La Biomasa se considera una fuente de energía limpia por su papel en la lucha contra el cambio climático. El uso de los recursos biomásicos puede incentivar las economías rurales, creando más opciones de trabajo y reduciendo las presiones económicas sobre la producción agropecuaria y forestal. En concreto el uso de la Biomasa aporta las siguientes ventajas (Ana Isabel de Lucas Herguedas, 2012):

- Disminución de las emisiones de CO₂ respecto a otros combustibles fósiles: Ya que, aunque para realizar el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión (que dará como resultado H₂O y CO₂), la cantidad de dióxido de carbono emitida, se considera que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Por tanto, esta combustión no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados (causantes de la lluvia ácida).
- La producción de Biomasa es totalmente descentralizada, basada en un recurso disperso en el territorio, que puede tener gran incidencia social y económica en el mundo rural. Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- La tecnología para su aprovechamiento cuenta con un buen grado de desarrollo tecnológico para muchas aplicaciones.
- Se puede almacenar y hace uso cuando existe mayor demanda

Además de ser la fuente renovable más común y generalizada en el mundo, su potencial es abundante. Hay mucha en todo el mundo y sin duda será una importante contribución en el suministro de demanda futura de energía de una manera sostenible (Peña, 2016).

La madera se puede utilizar para diferentes fines, pero el más extenso es como combustible en las comunidades rurales que todavía dependen de esta fuente de energía para calentar sus hogares y cocinar sus alimentos. En general, las comunidades utilizan y prefieren la madera local para combustible (Cardoso, et al. 2015). No todos los tipos de madera son iguales y, por tanto, sus atributos específicos les han conferido una preferencia determinada

frente a otras. Estos atributos son importantes en la selección de especies según las tareas diarias que deben realizar.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. Tales como composición física y química, contenido de humedad, porcentaje de cenizas, poder calorífico, densidad aparente, entre otros. Por esta razón el presente trabajo detalla una serie de ensayos que permitieron comparar diferentes especies forestales nativas respecto al género *Pinus*, ampliamente plantado en la región.

3. Antecedentes y Justificación

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. Siempre ha existido contaminación atmosférica de origen natural, por erupciones volcánicas, incendios, tormentas de arena, descomposición de la materia orgánica o polen, pero es a partir del descubrimiento del fuego por el hombre cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica o contaminación atmosférica en sentido estricto (Elsom, 1990).

Aunque se puede originar contaminación atmosférica por escapes o arrastres de gases u otro material volátil, almacenado o utilizado de diversas formas. La principal fuente de contaminación son los procesos que implican combustión ya que producen la oxidación de los distintos elementos que componen los combustibles, las materias primas y el aire. Entonces, los contaminantes pueden clasificarse desde su propia génesis. El carbono presente en los combustibles y el nitrógeno del aire, al oxidarse en los procesos de combustión, generan dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno respectivamente. Otros elementos constituyentes de los combustibles y materias primas determinan la emisión de partículas, óxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles (COV), dioxinas, furanos, etc. Por su parte, procesos de combustión incompletos generan la emisión de monóxido de carbono, partículas y bifenilos policlorados, entre otros (Aranguez, E. & et al., 1999).

Las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos de origen antropogénico pueden ser puntuales, generalmente fijas y de gran caudal de emisión, como es el caso de los grandes establecimientos aislados de otras instalaciones industriales. También pueden ser zonales, es decir, una mezcla de fuentes fijas y móviles de diferente entidad. Las cuales se agrupan en el espacio coincidiendo con asentamientos poblacionales que sufren los efectos de la contaminación.

Sin embargo, el conocimiento de los contaminantes y de las fuentes de emisión no abarca el complejo proceso de la contaminación atmosférica. Las características estructurales y dinámicas de la atmósfera así como las características morfológicas del terreno determinan la dispersión de los contaminantes en el espacio y su evolución temporal. Dicha dispersión

configura la concentración de contaminantes atmosféricos (inmisión) en la zona de influencia de la fuente emisora. La evolución de los contaminantes conlleva la aparición de otros nuevos no emitidos por la fuente directamente denominados contaminantes secundarios; como el ozono formado a partir de los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar, o el ácido sulfúrico formado a partir de la oxidación del dióxido de azufre (Aranguéz, E. & et al., 1999).

En las zonas rurales de la cordillera, tanto de Chile como de Argentina, el consumo de leña está profundamente arraigado en las tradiciones y la cultura local. La insuficiente provisión de gas natural de red (no subsidiado) y la abundancia de la biomasa forestal contribuyen a sostener el elevado consumo. Tal es el caso del paraje rural El manso, el cual se estudiará en el presente trabajo.

Muchos de los habitantes aprendieron de sus padres o sus abuelos a cocinar a leña. Así, para algunos ciudadanos el uso de la estufa o la cocina a leña es una costumbre difícil de cambiar. El calefaccionar mediante leña involucra ciertas actividades como recolectar leña, trozarla con un hacha, apilarla, entre otras, que generan una pauta de comportamiento y rutinas en los usuarios de leña más tradicionales. La adopción de una nueva tecnología involucra dejar de lado esa rutina que conlleva el consumo de leña, la que cambia drásticamente por las nuevas actividades de las tecnologías alternativas. La afectividad juega un papel principal en la continuidad del uso de leña (Boso et al., 2018).

Uno de los principales obstáculos reportados en la literatura para sustituir las estufas de leña se encuentra en las limitaciones económicas que pueden presentar sus usuarios. Cuando se comparan otras alternativas de calefacción como la parafina, el gas o los calefactores eléctricos, el funcionamiento de las estufas supone un bajo costo, especialmente si se emplea leña de baja calidad (Hine et al., 2007).

Por otro lado, una de las ventajas que los usuarios más atribuyen a las estufas a leña es su multifuncionalidad. Se observa que la utilidad de la estufa a leña no se limita exclusivamente a calefaccionar sino que existen varios usos adicionales como secar y planchar ropa, cocinar o calentar el agua de la tetera que forman parte de las prácticas sociales que estructuran el quehacer cotidiano en el hogar (Boso et al., 2018).

Diversos estudios muestran que los usuarios de estufas de leña construyeron un lazo afectivo positivo hacia el calor producido por el fuego de la leña, el cual se tiende a asociar casi de forma innata con sentimientos de comodidad, felicidad y calidez, además de nostalgia de la niñez y de la convivencia familiar en torno a la leña (Boso & Álvarez, 2017).

La calefacción a leña, en Chile, es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica; siendo que ocho de las diez ciudades más contaminadas del mundo, pertenecen a este país y son producto de la combustión de leña no certificada (Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile, 2022).

Un ejemplo de esto lo encontramos en la región centro sur de Chile, debido al amplio uso de calefacción y cocción por combustión a leña en el ámbito doméstico. Las bajas temperaturas en los meses de invierno, sumado a la deficiente aislación térmica en los materiales de construcción de los hogares, genera una imperante necesidad de calor para calefacción (Schueftan & González, 2015).

Según Cereceda & Baliceta, et al. (2012) calculan que más del 80% de la población que reside en las regiones del sector sur, como Temuco, utilizan leña como combustible en su hogar. Esta última fue declarada como ciudad con causa única de contaminación por la combustión a leña, debido a los altos niveles de PM2.5.

Según los datos de CASEN¹ (2013), la contaminación en Temuco tiene un carácter estacional presente durante abril a septiembre donde se registra una superación a la norma diaria para PM10, promediando 150 µg/m³ por día. En 2009 y 2015 se implementaron dos Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) para emisiones de PM10 y PM2.5, respectivamente, enmarcados en la Estrategia Nacional de Descontaminación del Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2014). A pesar de los esfuerzos realizados en forma de incentivos, regulación y comunicación del riesgo, todavía existe un bajo grado de implicación ciudadana en el control de la contaminación atmosférica (Boso et al., 2018).

El aumento del consumo de leña para calefacción empuja el uso no sostenible de los bosques existentes en la periferia de las ciudades. Por ello considerar aumentar la utilización de leña proveniente de plantaciones comerciales de género *Pinus*, ayudará a disminuir la presión sobre los mismos.

Entre las plantaciones forestales comerciales más importantes se encuentran las del género *Pinus*, plantas pertenecientes al grupo de las coníferas y dentro de este a la familia de las pináceas. Los pinos poseen unas 110 especies repartidas en todo el mundo, que son una fuente inagotable de madera y de otros derivados como el papel y la resina de donde se obtienen una serie de subproductos de uso doméstico necesarios para la vida moderna (Rivero, 2021). El pino ponderosa es la conífera de rápido crecimiento más empleada en la región Andino Patagónica Argentina. Tiene un gran potencial de adaptación para forestar vastas extensiones del ecotono andino, mostrando crecimientos significativamente mayores que en los lugares de origen en los Estados Unidos (Gonda et al., 2009). El *Pinus* es una especie que tiene densidad básica baja, con un rango entre 351 a 550 Kg/m³ (Keil et al, 2013), se trabaja fácilmente, tanto a mano como con herramientas mecánicas. Otra característica que presenta esta especie es que su madera seca fácilmente (Gonda et al., 2009).

Sin embargo la leña proveniente de las plantaciones de pinos es rechazada por la mayoría de los consumidores debido a su mal comportamiento energético y al riesgo de incendios en los hogares. El pino tiene mucha resina, de modo que ante una mala combustión

¹ Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional. Es una encuesta a nivel nacional, regional y comunal que realiza el gobierno de Chile y se caracteriza por medir las condiciones socioeconómicas de los hogares del país en términos de acceso a la salud, la educación, el trabajo y a las condiciones de la vivienda.

va formando un humo negro y denso que recubre el interior y se supone un riesgo de incendio (Zanardi, Pablo, 2012)

El presente proyecto busca estudiar y comparar el comportamiento de la leña del género *Pinus* con las especies madereras locales nativas, con el fin de incentivar su uso y evitar el aumento del deterioro sobre las masas de bosques nativos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento energético y la emisión de gases de combustión de la madera del género *Pinus*, respecto de las especies de árboles locales utilizadas para calefacción hogareña, en el valle superior de El Manso en Río Negro.

4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar las normativas nacionales (IRAM) e internacionales (ISO, EPA, CH, UNE-EN) sobre las emisiones para equipos de combustión de biomasa y calidad de los biocombustibles.
- Determinar las propiedades físico químicas por medio de análisis de termogravimetría, contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles, espectroscopia infrarroja del género *Pinus* y de las especies locales, *Nothofagus*, *Lomatia* y *Salix pp.*
- Determinar las propiedades energéticas como poder calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) de la biomasa del género *Pinus* y de las especies locales *Nothofagus*, *Lomatia* y *Salix pp.*
- Realizar ensayos comparativos de la leña del género *Pinus*, *Nothofagus*, *Lomatia* y *Salix*, comparando las emisiones de gases de combustión y el comportamiento energético.
- Comparar el comportamiento energético (eficiencia de combustión y emisión de gases) en función de las normativas nacionales e internacionales.

5. Hipótesis

- El uso de leña del género *Pinus* con porcentajes de humedad entre 40 y 50%, presenta un pobre comportamiento energético y es una fuente de gran contaminación.
- Bajo el mismo tratamiento físico, la leña proveniente de la especie del género *Pinus* tiene un comportamiento energético similar a la leña proveniente de: *Nothofagus antártica* (ñire), *Salix spp.* (sauce), *Nothofagus dombeyi* (coihue) y *Lomatia Hirsuta* (radal).

6. Metodología

6.1. Área de estudio

6.1.1. Descripción General

El ejido de El Manso se extiende desde el Parque Nahuel Huapi hasta El Bolsón, donde viven 1.500 habitantes en los parajes rurales de El Manso Superior, El Manso Medio, El Manso Inferior, Río Villegas y El Foyel (Imagen 1).

La cuenca del río Manso Superior se extiende desde el Cerro Tronador (3.554 m.s.n.m) hasta la cabecera occidental del Lago Mascardi (793 m.s.n.m). Su superficie es de 247 kilómetros cuadrados y su eje mayor, orientado en dirección NO-SE, mide 23 kilómetros (Gallopín, et. al 2005).

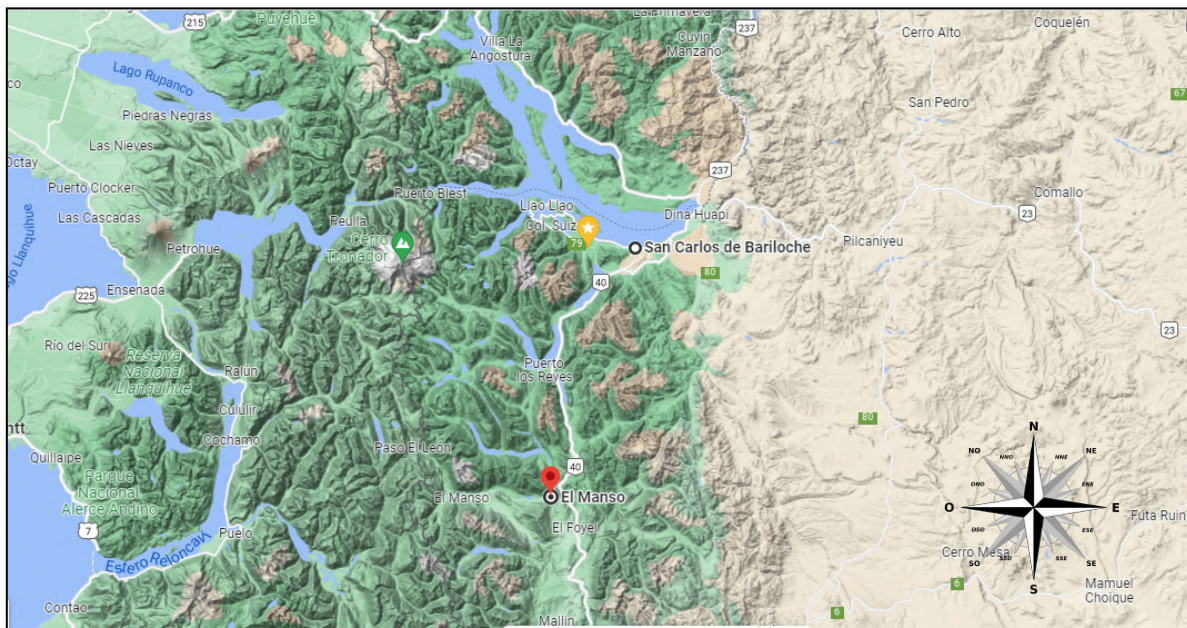


Imagen 1: Foto satelital distancia entre S.C. de Bariloche y El Manso.

Fuente: Google Earth, 2022.

El Manso no cuenta con un centro urbano sino que es una comunidad rural dispersa a lo largo del valle. Tiene dos poblados: Foyel y Río Villegas. La actividad ganadera junto con el turismo aportan la mayor parte de los ingresos de los pequeños productores y en menor

medida la actividad forestal centrada en el aprovechamiento de los bosques nativos (Gallopín, et al., 2005).

La explotación forestal informal por parte de los pobladores incluye trabajos de apeo de cipreses que generalmente son procesados en aserraderos de El Bolsón. La actividad es extractiva de árboles secos en pie ya que los planes de manejo sostenibles, promovidos por la ley de Bosques Nativos Nacional 26.331, son incipientes en la región. La obtención de leña se combina con el desmonte para generar “claros” para el pastoreo y se destina al consumo interno o a la venta. La extracción de leña incluye a especies de ñire, laura, maqui, retamo y radial que se comercializa como leña trozada a 30 centímetros o dispuesta por metro cúbico. La actividad genera ingresos monetarios por la venta del producto o por la mano de obra demandada. Algunos de los productores en la actualidad poseen motosierras para el trozado de leña y realización de diversas tareas como el apeo de árboles, raleos y limpiezas (Madariaga, 2019).

El clima del valle es templado moderado, lluvioso, con precipitaciones que oscilan entre 1.000 y 3.000 milímetros anuales, concentrados durante los meses de invierno (Gallopín, 2005). Las cuatro estaciones del año se manifiestan bien diferenciadas, aunque la primavera y el otoño son las más cortas y el invierno la más larga. El clima de la Región Andina está influenciado principalmente por los vientos húmedos del Océano Pacífico. Esto conduce a un verano fresco y seco, un invierno muy frío y húmedo, sin periodo libre de heladas. La temperatura media anual es de 8°C en las zonas más bajas y de 5,5°C en las laderas altas, alcanzando -8°C en invierno y 30°C en verano (Madariaga, 2019).

Debido al frío característico de la zona es imprescindible contar con fuentes de calefacción.

Dentro de las fuentes, las familias también utilizan como combustibles, el gas envasado. El gas es comprado y utilizado de manera restringida para cocinar. La compra de leña y el uso de combustibles alternativos implica para las familias destinar gran parte de sus ingresos para poder cubrir esta necesidad, principalmente en el invierno.

6.1.2. Vegetación Natural

La vegetación presenta escalonamiento debido a que se trata de un valle en una zona montañosa bajo la influencia de los vientos húmedos del Océano Pacífico. El fondo del valle posee praderas de origen antrópico donde se asienta la población y donde se concentra la agricultura y ganadería de subsistencia. A medida que se asciende desde el fondo del valle encontramos los radales (*Lomatia hirsuta*), cipreses (*Austrocedrus chilensis*) y ñires. Los ñires (*Nothofagus antártica*) que ocupan las pampas están acompañados por el maqui (*Aristotelia maqui*) y ambos constituyen el monte leñoso, de gran importancia para la vida cotidiana. Se encuentran también algunos ejemplares en bosquecillos o aislados de arrayanes (*Myrceuganella apiculata*). A los 800 metros de altura el canelo (*Drimys winteri*) se asocia formando el sotobosque donde abunda la lenga (*Nothofagus pumilio*); luego a más altura

aparecen en profundidad las cañas colihue (*Chusquea culeou*), allí donde las lengas alcanzan su mayor expresión. El coihue (*Nothofagus dombeyi*), especie perennifolia, prefiere los cañadones húmedos y sale de éstos indicando con su presencia el nivel de humedad. También están presentes especies del género *Berberis*. Hacia el oeste la vegetación se hace más densa en correlato con el aumento de humedad y precipitaciones; abunda el coihue y adquiere las particularidades de la Selva Valdiviana (Imagen 2). La vegetación exótica más difundida en la zona es el pino oregón y ponderosa, implantados en forestaciones de uso comercial, ubicadas únicamente en la jurisdicción provincial de la cuenca. Existe también rosa mosqueta, matorral ampliamente difundido en toda la región cordillerana que invade todos los campos modificados.

La vegetación herbácea y arbustiva se somete a pastoreo continuo con vacunos y ovinos y se manifiesta un empobrecimiento en cantidad y calidad de la masa forrajera disponible. Además, la renovación natural del bosque existente se ve gravemente reducida por el pastoreo continuo, donde los vacunos ramonean las plantas juveniles impidiendo el desarrollo de los renovales. La vegetación arbórea se aprovecha para leña, de ñire principalmente, y para aserrado en caso del ciprés. En la jurisdicción de administración provincial el bosque se aprovechó históricamente para la extracción forestal y fue modificado por la aplicación de fuego orientado a generar campos de pastoreo para ganado ovino y vacuno. Las explotaciones madereras se realizaron a partir de la tala del bosque nativo e implantación de especies exóticas de crecimiento acelerado: pino ponderosa y oregón.



Imagen 2 : Bosque de Nothofagus, Austrocedrus Chilensis y Maytenus Boaria. El Manso Superior.

Fuente: Imagen propia

6.2. Composición de la biomasa

Biomasa

La biomasa está formada principalmente por materia orgánica y por una pequeña parte de materia inorgánica. Los principales componentes orgánicos estructurales de la biomasa son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Además, existe una pequeña cantidad de otros extractos orgánicos, e incluso otros componentes o minerales orgánicos minoritarios. La cantidad de cada uno de ellos depende de la especie, del tipo de planta y del estado y de las condiciones de crecimiento de la planta. Las especies de madera se caracterizan por un crecimiento lento y por estar constituidas por fibras unidas fuertemente, dando lugar a una superficie externa dura.

Char

Se denomina char al residuo carbonoso que queda tras la pirólisis de la biomasa en cuestión, que está formado principalmente por carbono y cenizas, pero que también contiene hidrógeno, oxígeno y una pequeña cantidad de nitrógeno y azufre.

La preparación de carbón vegetal (char) se realiza en atmósfera deficiente de oxígeno, a bajas temperaturas (menores que 673 K) y tiempos de residencia largos. Las velocidades de calentamiento lentas favorecen la formación de char. La producción y propiedades de este dependen principalmente de la temperatura de pirólisis, la naturaleza de la biomasa y la presencia de sustancias inorgánicas (Rocca, 1998)

Celulosa

La celulosa es el componente mayoritario de la biomasa. Es un polímero de glucosa que consiste en cadenas lineales de β -D glucopiranosas vinculados con enlaces 1-4-glucosídicos. Este carbohidrato tiene una estructura fibrosa con una superficie lisa. La degradación de la celulosa se produce entre las temperaturas de 240°C y 350°C para producir anhidrocelulosa y levoglucosano. Según Yang et al. (2007) la celulosa se degrada entre las temperaturas de 315°C y 400°C mediante un proceso endotérmico y el principal gas emitido durante su volatilización es el monóxido de carbono (CO). La celulosa es generalmente la mayor fracción, y representa aproximadamente el 40-50% de la biomasa en peso. Los altos valores de celulosa son característicos de subgrupos como las maderas y las biomásas herbáceas y agrícolas; los valores extremadamente altos son típicos de variedades de papel, algodón, lino o girasol; por el contrario, la baja concentración en celulosa es típica de cortezas y hojas

Hemicelulosa

La hemicelulosa es el segundo componente mayoritario en la biomasa. Es una mezcla de polisacáridos ramificados heterogéneos complejos, compuesta casi en su totalidad por azúcares tales como la glucosa, la manosa, la xilosa, la arabinosa y diversos ácidos. Las partículas de hemicelulosa tienen forma irregular y poseen fracturas en su superficie. El inicio de la descomposición térmica de la hemicelulosa se produce a temperaturas más bajas que el

de la celulosa. Yang et al. (2007) comprobaron que la hemicelulosa se descompone entre las temperaturas de 200°C y 315°C, en un proceso principalmente exotérmico cuyo principal producto emitido es el gas dióxido de carbono (CO₂). Según Mohan la hemicelulosa se descompone en el rango de temperaturas de 200°C y 260°C, dando lugar a más volátiles, menos alquitranes y menos char que la celulosa. La porción de hemicelulosa representa entre un 20-40% del material en peso.

Lignina

La lignina es el tercer componente en la biomasa, es un polímero irregular de compuestos amorfos y alto peso molecular, formado por unidades de fenilpropano. Es el aglutinante principal para la aglomeración de los componentes fibrosos celulósicos y además también proporciona un escudo contra la destrucción microbiana o fúngica de las fibras celulósicas. Las partículas de lignina normalmente presentan una forma semiesférica y a menudo están unidas a la celulosa como material de incrustación; así se puede encontrar lignina incrustada en las paredes celulares, uniando las células entre sí o uniando y aglomerando las fibras celulósicas. La lignina tiene un intervalo de descomposición mucho más amplio que la celulosa y la hemicelulosa, que comprende el rango de temperaturas de entre 160°C y 900°C. Principalmente, se descompone de manera exotérmica liberando mayoritariamente hidrógeno (H₂) y metano (CH₄). La lignina representa entre un 23% y un 33% de la masa en las maderas blandas y entre el 16% y el 25% de la masa en las maderas duras. La pirólisis de lignina produce más char residual que la pirólisis de celulosa. El poder calorífico de la biomasa aumenta a medida que aumenta el contenido en lignina.

Ceniza

La ceniza se compone principalmente de ciertos minerales componentes y oligoelementos, así como también tiene algunos metales alcalinos y alcalinotérreos. Algunos de los componentes son potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca), silicio (Si), magnesio (Mg), fósforo (P), etc. Las cenizas están presentes en la biomasa generalmente a través de dos rutas: ya sea por contaminación del suelo durante las prácticas de cosecha y recolección o es la ceniza estructural que se encuentra dentro de la pared celular de la planta, que se formó naturalmente a través del proceso fotosintético. Las condiciones de cultivo, cosecha y prácticas, operaciones de manejo, etc., dan lugar a las diferencias en el porcentaje de cenizas en cualquier biomasa. Algunos de los problemas que se encuentran al usar biomasa con alto contenido de cenizas es que durante la combustión, la ceniza puede derretirse y formar depósitos en las superficies de la cámara de combustión (incrustaciones) o permanecer como trozos duros de material en la base de la cámara de combustión (escoria/escoria) (Biswas, et al., 2022).

6.3. Ensayos de combustión

Estufa Bosca

En el presente trabajo se utilizó un calefactor a leña ECO 350 doble combustión - Bosca S.A. Fabricado en Chile.

Algunas características de la estufa son:

- Material: Acero
- Potencia Nominal 7.3 kW
- Potencia Calefacción Ambiental: 7.3kW
- Rendimiento 68%
- Emisión de material particulado 1.55g/h
- Medidas: alto 60,7 cm, ancho 38cm, profundidad 49.5cm

Los calefactores de doble combustión están provistos de una entrada de aire secundario, el cual es precalentado a elevadas temperaturas. Este aire caliente se mezcla con los gases de la combustión quemando la materia volátil y reduciendo el material particulado. Este proceso se conoce como post combustión(Imagen 3).

El fabricante establece una serie de pasos fundamentales para el correcto encendido de la estufa y así poder llegar a la potencia nominal.

1. Deslizar el control de aire hasta la posición de encendido.
2. Poner papel arrugado en el centro de la caja de fuego.
3. Poner varias tablillas sobre el papel y algunas astillas encima, preferentemente en posición vertical.
4. Encender el fuego y juntar la puerta de su calefactor y mantener así hasta que las astillas estén encendidas.
5. Abrir la puerta y agregar la carga de leña (no más de 3 leños), poniendo los leños más livianos sobre las astillas encendidas. Es muy importante dejar espacios entre los leños ya que esto permitirá la circulación de aire y por lo tanto un encendido más rápido y vigoroso.
6. Dejar la puerta junta hasta que se inicie el fuego en los leños recién incorporados.
7. Cerrar la puerta y deje el Control de Aire en posición de encendido por unos 10 minutos o hasta que el fuego esté vigoroso, para finalmente dejarlo en posición "máximo"

La altura máxima de recarga es por debajo del vano de la puerta, cargue el calefactor de a dos o tres leños(Manual de usuario calefactores a leña Bosca, 2020).

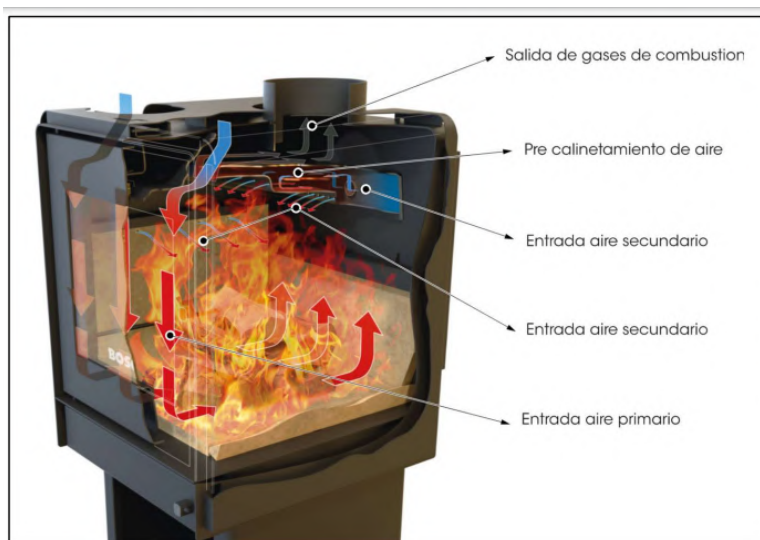


Imagen 3: Esquema interno de la estufa Bosca.

Fuente: Manual de usuario calefactores a leña Bosca, 2020.

Para el diseño de este ensayo se tomó como base la normativa chilena:

- **Método CH-5G. Determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución.**

Los gases de la combustión de un calefactor a leña se recogen con una campana de recolección total y se combinan con aire de dilución ambiente. Esta norma detalla el sistema de construcción recomendada para el túnel de dilución (Imagen 4).

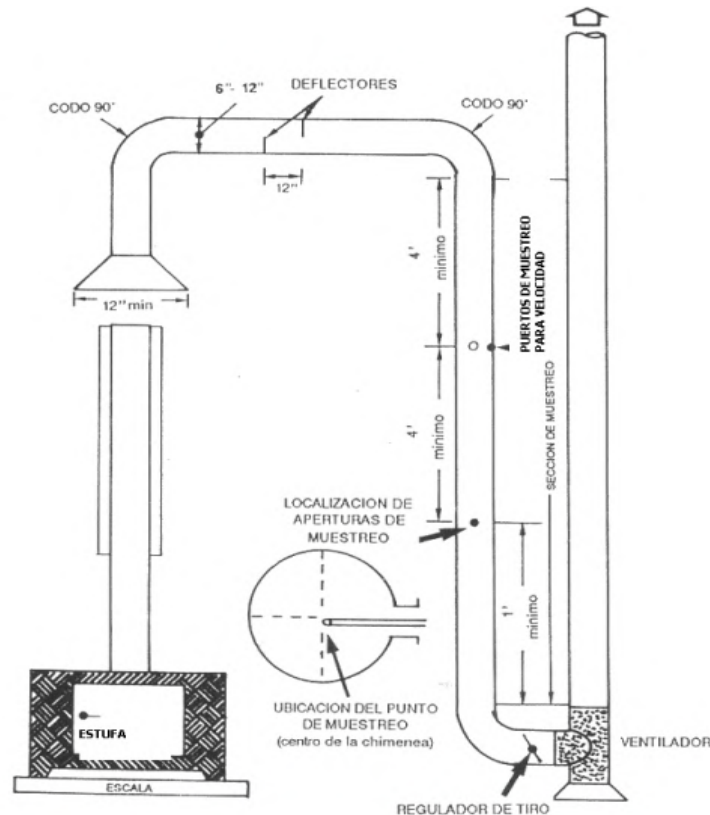


Imagen 4: Sistema de construcción recomendada por el método CH-5G.
Fuente: Instituto de Salud Pública de Chile, 2012.

- **Método CH-28: Determinación de material particulado y certificación y auditoría de calefactores a leña.**

Se miden las emisiones del material particulado de un calefactor a leña, el cual quema un combustible en un contenedor de prueba, manteniendo reguladas las condiciones preestablecidas. Esta normativa proporciona tamaños de leños, disposición de los mismos, procedimientos para determinar la velocidad de quemado, velocidad de emisión de partículas y para obtener datos normalizados.

Para llevar a cabo estos procedimientos se utilizaron varios equipos de medición. Dos de ellos, eran analizadores de gases de combustión marca **Testo modelo 310** para la medición de CO, O₂(oxígeno remanente) y temperatura de gases en chimenea, mediante cálculos, proporciona otros parámetros como: CO corregido al 0% de O₂ (μCO), CO₂, lambda (λ indica la relación de oxígeno estequiométrico necesario y el oxígeno real) y la eficiencia de la

combustión (η). Se emplearon 2 ya que cada uno estaba ubicado en diferentes puntos de muestreo. Por otro lado se empleó una báscula la cual se encontraba debajo de la estufa e iba marcando la pérdida de peso de biomasa a medida que pasaba el tiempo. Y por último se empleó una termocupla, la cual nos daba un valor de temperatura de referencia en la salida de la estufa (Imagen 5).

Se reguló el tiro en 0.15hpa con el Testo, y se mantuvo el mismo en todas las quemas.



Imagen 5: Sistema de construcción según método CH-5G.

Fuente: Imágen Propia

Cortado o trozado

El muestreo a campo se llevó a cabo en el mes de septiembre del 2022, los troncos fueron donados por un poblador los cuales eran destinadas para calefacción hogareña y representativa de la zona: coihue (*Nothofagus dombeyi*), ñire (*Nothofagus antártica*), radial (*Lomatia hirsuta*) y sauce (*Salix humboldtiana*), y por otro lado, en el mes de diciembre se recolectó leña de pino ponderosa dentro en el predio del CIEFAP.

Se usaron entre 3 troncos por especie de aproximadamente 60 cm de alto, obteniendo así un peso promedio de 50 kg de biomasa por especie (Imagen 6). El tamaño muestral está dentro del rango utilizado comúnmente en la caracterización energética de la madera. Durante el proceso de selección se descartaron aquellos individuos que no se presentaban en buen estado (hoyos debido a insectos o podredumbre, entre otros.)



Imagen 6: Material leñoso apilado.

Fuente: Imagen propia.

Se trasladó todo el material a la delegación de CIEFAP (Bariloche) donde se llevaron a cabo los ensayos. Cada tronco se cortó a la mitad con motosierra y luego se los trozó con hacha para obtener leños de aproximadamente de 2x4 pulgadas, tamaño que se relaciona con el volumen de la cámara de combustión, según el Método CH-28. Luego se apiló la leña separada por especie y se rotuló. Lo mismo se hizo con los troncos de pino.

Secado

El proceso de secado consiste en extraer agua de la biomasa a fin de lograr un producto de menor humedad. La reducción del contenido de humedad de las biomásas lignocelulósicas húmedas (contenido de un 40-50% de humedad sobre base húmeda) puede lograrse mediante un secado natural de unos 9-10 meses aproximadamente. Durante este período de maduración, la leña, al estar en grandes superficies al aire libre, recibe las inclemencias del tiempo, lluvias, granizos, ventisca. Esto no afecta a su secado, ya que la corteza le protege y además no hay nada que alimente de agua su interior, como ocurría cuando formaba parte del árbol, es decir no tiene savia.

Para este trabajo, se realizó un secado asistido. La leña de todas las especies, se secaron en estufa lo suficiente hasta obtener una humedad entre el 8 y 16%, tales valores son considerados como leña seca. Se dejó un lote de leña de pino húmeda (35 al 55%) para realizar los ensayos de contraste.

Se tomaron 2 leños por especie para determinar en laboratorio, humedad, densidad, ceniza, y poder calorífico superior. Los ensayos de combustión se hicieron por triplicado.

Velocidad de quemado, es la velocidad en que se consume el combustible utilizado durante la prueba en un calefactor a leña. A continuación se presentan las categorías de velocidad de quemado según Método CH-28(Tabla 1).

Tabla 1: Categorías de velocidad de quemado.

Categoría de Velocidad de quemado (Promedio kg/h, base seca)			
Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4 (Velocidad máxima de quemado)
< 0,80 < 1,76	0,80 a 1,25 1,76 a 2,76	1,25 a 1,9 2,76 a 4,19	1,9 < 4,9 <

Fuente: Método CH-28

Velocidad de quemado según CH-28

$$BR = \frac{60W_{wd}}{\theta} \times \frac{100 - \%M_w}{100}$$

Ecuación 1: Velocidad de quemado según método CH-28

BR = Velocidad de quemado de leña, Kg/h

W_{wd} = Masa total de madera quemada durante la corrida de las mediciones, Kg

θ = Tiempo total de la corrida de medición, min

$\%M_w$ = Humedad promedio en la carga de combustible de ensayo, base húmeda, por ciento.

Etapas de combustión

Secado de madera

Para que el combustible empiece a quemarse, es necesario aplicar calor y elevar la temperatura del mismo hasta el punto de ignición (cada material según sus características tendrá una temperatura diferente de ignición espontánea) en presencia del oxígeno necesario para la combustión.

La madera se compone principalmente de carbono (celulosa), y al quemarse combinándolo con el oxígeno produce el CO_2 que es eliminado por la chimenea. Cuando un trozo de madera alcanza el punto de ignición, este trozo de madera reacciona químicamente con el oxígeno liberando calor (en forma de radiación y gases calientes) y luz, y parte de ese

calor que libera es aplicado a los trozos contiguos, alcanzando asimismo el punto de ignición y repitiéndose el proceso, extendiendo la llama lentamente(Imagen 7).

La madera también tiene una proporción de agua; inicialmente la superficie exterior de leña recibe calor por radiación de las llamas, calentando el agua contenida en la madera por encima de su punto de evaporación. En este momento se inicia el proceso de secado, liberando la humedad en forma de vapor de agua. Este proceso de secado consume una fracción importante de la energía liberada en el proceso de combustión. Mientras mayor sea el contenido de agua inicial, una mayor cantidad de energía se consumirá en este proceso de secado y más lento se torna la primera etapa de calentamiento de la leña, y más ineficiente es la combustión con el consiguiente incremento de emisiones nocivas, en definitiva la diferencia entre “leña seca” y “leña verde” o recién cortada(Servicio de Evaluación Ambiental, 2013).



*Imagen 7: Inicio del fuego. Secado entre los 100 y 150°C.
Fuente: Imagen propia.*

Gasificación y oxidación de la materia volátil

Al calentarse la madera seca por encima del punto de ebullición del agua, se inicia la segunda fase de pirólisis con la liberación de la materia volátil. En esta etapa, la leña comienza a humear. El humo es el resultado visible de la descomposición térmica de la madera y se compone principalmente de una nube de gotitas combustibles de gases e hidrocarburos (alquitrán). Éstos se oxidan sólo bajo altas temperaturas y si además existe presencia de suficiente oxígeno. Este proceso de combustión con liberación de calor produce llamas largas y brillantes, que son características de la combustión de la leña seca(Imagen 8).

Si la materia volátil no se quema por completo al interior del fogón, se emitirán gases no quemados, que condensarán sobre las paredes frías de los ductos de evacuación, formando los depósitos de creosota. También estos compuestos no quemados serán emitidos posteriormente como humo de color visible con una fuerte contaminación atmosférica en el área. El humo también representa una pérdida de eficiencia, porque contiene una gran parte de la energía presente en la madera(Servicio de Evaluación Ambiental, 2013).



Imagen 8: Pirólisis, liberación de materia volátil, 250°C
Fuente: Imagen propia.

Quemado del carbón residual

Al liberarse completamente la materia volátil de la madera, permanece como producto residual el carbón sólido junto a la ceniza no combustible (Imagen 9). Este compuesto sólido equivale al carbón de madera y se caracteriza por su combustión superficial con un resplandor rojo y llama muy pequeña generando una alta temperatura entre 600 y 1.000 °C. El carbón es un combustible limpio que se quema fácilmente con presencia de suficiente oxígeno sin generar humos. En la práctica, las tres fases de combustión de madera anteriormente descritas ocurren simultáneamente. Esto significa que los gases de la materia volátil pueden estar quemándose con largas llamas mientras que sobre la superficie del combustible el carbón se quema con el característico resplandor rojo y el agua en el centro de la leña se evapora lentamente (Servicio de Evaluación Ambiental, 2013).



Imagen 9: Formación de carbón sólido más ceniza.
Fuente: Imagen propia.

6.4. Caracterización de los biocombustibles

Técnicas analíticas

La aptitud de una fuente de biomasa para distintos usos energéticos dependen, en gran parte, de sus propiedades intrínsecas, y luego, de la efectividad de su proceso de transformación a biocombustible. Para evaluar estos puntos, se han desarrollado diferentes ensayos y mediciones.

Se analizaron los combustibles en base a procedimientos establecidos por normativas internacionales.

- Clasificación de biocombustibles sólidos (ISO 17225-5)
- Densidad Básica
- Determinación del contenido de humedad (ISO 18134-2)
- Determinación del contenido de cenizas (ISO 18122)

6.4.1. Determinación del contenido de humedad

Este análisis determina el porcentaje de agua contenida en una muestra de biomasa.

A campo se tomó la humedad con un Xilohigrómetro Testo 606-2 (Imagen 10) y en el laboratorio se determinó con una estufa exponiéndose a 105°C, según norma ISO 18134-2 (Imagen 11). Este parámetro es importante por su influencia, tanto en los procesos de transformación energética como ocurre con la combustión, como también en la degradación del material y las dificultades en la densificación.



Imagen 10: Determinación de humedad por xilohigrómetro.

Fuente: Imágen propia.



Imagen 11: Determinación de humedad mediante estufa.

Fuente: Imagen propia.

El cálculo para determinar la humedad es el siguiente, cuyo resultado se reporta en porcentaje(base húmeda)(ISO 18134-2):

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

Ecuación 2: Cálculo de humedad, según ISO 18134-2.

m_1 es la masa del recipiente de secado vacío, en g;

m_2 es la masa del recipiente de secado y la porción de prueba antes del secado, en g;

m_3 es la masa del recipiente de secado y la porción de prueba después del secado en gr

6.4.2. Densidad básica

La determinación de la densidad básica fue realizada por el teorema de Arquímedes, ya que se considera uno de los métodos más prácticos y exactos, y el más utilizado para la medición de material leñoso de formas irregulares(Imagen 12). Se trata de medir el volumen del trozo de madera en función del peso del líquido desplazado por inmersión (medición del empuje). Al sumergir la muestra en un recipiente con agua, se produce una diferencia, equivalente al peso del agua desplazada, que equivale al volumen de la pieza sumergida (Fernández-Puratich. 2012).

La densidad básica (ρ) se calculó de acuerdo a la siguiente expresión (Přemyslovská et al., 2007), Se expresa en unidad de masa por unidad de volumen, generalmente, en kg/m³ o g/cm³:

$$\text{Densidad básica } \rho = \left(\frac{P_s}{P_h} \right) * \rho_a$$

Ecuación 3: Densidad básica.

P_s = es el peso del material seco (gr)

P_h = es el empuje que realiza la muestra sumergida que es igual al peso del líquido desplazado (gr)

ρ_a = densidad del agua en g/cm³

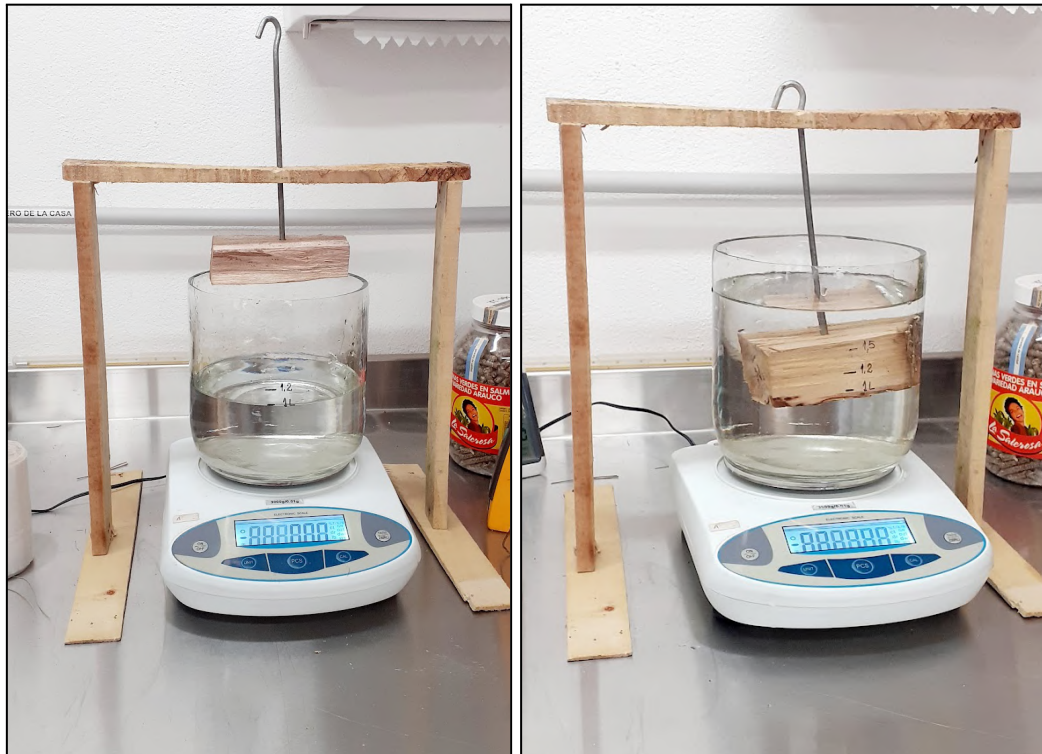


Imagen 12: Determinación de la densidad del combustible a través del método de Arquímedes.

Fuente: Imágenes propias.

6.4.3. Determinación del contenido de cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia. Tiene influencia tanto en la formación de escoria y deposiciones en los sistemas de combustión como en las emisiones gaseosas y de material particulado. Las normativas destinadas a la definición de combustibles biomásicos para uso doméstico limitan el contenido de cenizas a valores muy estrictos, lo cual permite que sean usados en equipos estándar sin ocasionar problemas a los usuarios. El ensayo que evalúa este parámetro, consiste en la calcinación de una muestra de biomasa a 550°C de temperatura. Este ensayo se realiza sobre un 1 gramo de muestra molida a un tamaño menor a 1mm y luego se coloca dentro de una mufla durante 4 horas y media aproximadamente según ISO 18122(Imagen 13).



Imagen 13: Determinación de contenido de cenizas. Molienda, tamizado y calcinado en mufla del material leñoso.

Fuente: Imágenes propias

El cálculo de contenido de cenizas se reporta en base seca(ISO 18122)

$$A_d = \frac{(m3-m1)}{(m2-m1)} * 100 * \frac{100}{100-M_{ad}}$$

Ecuación 4: Cálculo de ceniza, según ISO 18122.

m1 es la masa del recipiente de secado vacío, en g;

m2 es la masa del recipiente de secado y la porción de prueba, en g;

m3 es la masa del recipiente de secado y la ceniza en gr

M_{ad} es el contenido de humedad en porcentaje de la porción de ensayo usada para la determinación

6.4.4. Determinación del Poder Calorífico

Se distinguen el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI). La diferencia entre ellos radica en cómo se trata el vapor de agua que se genera durante la combustión. Si luego de la combustión el vapor de agua generado se condensa liberando su calor latente, y éste es contabilizado, entonces se trata del PCS (Cerde 2015). De lo contrario, si el vapor de agua se pierde junto con otros gases de combustión, se obtiene el PCI. En la práctica, este último es el que interesa, debido a que no es posible aprovechar el calor latente de condensación (Marcos & Villegas 2000). El PCS se determina experimentalmente mediante una bomba calorimétrica, mientras que el PCI se calcula a partir del PCS, del porcentaje de humedad, y del contenido de hidrógeno de la madera.

Poder calorífico Superior: El procesado del material fue el mismo que el utilizado en la determinación del contenido de cenizas. Una vez obtenidas las alícuotas, estas fueron enviadas a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) para su análisis. Para la determinación del PCS se utilizó una bomba Calorimétrica de Oxígeno 6200, Marca Parr, según normas ASTM D240 64 y ASTM D271-70(Tabla 5).

Poder calorífico Inferior: El PCI se puede obtener de acuerdo a la siguiente expresión (Orduña 2016):

$$PCI = (PCS - 49,28 * H) * \frac{100-hT}{100-h} - 23 * hT$$

Ecuación 5: Expresión Poder calorífico inferior (PCI)

Dónde, H es el contenido de hidrógeno de la muestra, expresado en porcentaje; hT es el contenido de humedad de la muestra, expresado en porcentaje; y h es el contenido de humedad de la muestra que se utilizó para el cálculo del PCS, expresado en porcentaje. Como en este caso, el PCI se calcula en base seca (hT= 0), con material seco (h= 0), la expresión anterior se reduce a:

$$PCI = PCS - 49,28 * H$$

Ecuación 6: Expresión Poder calorífico inferior (PCI) en base seca y material seco.

El porcentaje de hidrógeno de la biomasa forestal varía mínimamente de unas especies a otras (Carmona-Cerde 2015). En Pino, radial y ñire se utilizaron valores de H obtenidos en la bibliografía, 6,6%, 6,1% y 5,4% respectivamente. Para las demás especies estudiadas no se encontró información por lo que se utilizó 5,9%, el promedio de otras especies nativas de la región para las cuales H ha sido reportado (Carmona-Cerde, 2015).

6.4.5. Eficiencia de combustión

Para un buen aprovechamiento energético es necesario que la transformación de la energía química del combustible en calor y la transmisión de calor a la carga sean máximas o, dicho en otros términos, que las pérdidas de calor sean mínimas.

El analizador de gases empleado en los ensayos Testo 310, calcula automáticamente la eficiencia energética mediante los siguientes cálculos.

$$\eta = 100 - qA$$

Ecuación 7: eficiencia de combustión

qA = Pérdidas por gases

Pérdida térmica por humos, f es un factor específico del combustible y se obtiene por tabla.

$$qA = f * \frac{FT - AT}{CO_2}$$

Ecuación 8: Fórmula de Siegert.

FT : temperatura del gas de combustión

AT : temperatura del aire que ingresa a la combustión

Las pérdidas en los gases de combustión son la diferencia entre el contenido calorífico de los gases de combustión y el contenido calorífico del aire de la combustión, con relación al poder calorífico neto del combustible. Cuanto mayores son las pérdidas en los gases de combustión, más bajo es el rendimiento y por consiguiente la explotación de la energía y mayores son las emisiones de una instalación de calefacción

Técnicas analíticas aplicadas

En la Imagen 14 se observa un esquema de las técnicas analíticas que se aplican a los largo del presente TFI y su utilización en este trabajo. Para conocer el comportamiento térmico de una muestra se puede utilizar el TG-DTA (Termogravimetría y Análisis Térmico Diferencial) y determinación de volátiles por cromatografía gaseosa. En cuanto al análisis químico, se diferencia entre el análisis elemental para determinar los elementos que componen una muestra, que se pueden obtener mediante SEM-EDS (Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva de rayos X) y el análisis composicional para determinar los compuestos que forman parte de una muestra y que se pueden conocer mediante FTIR (Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier) o DRX (Difracción de Rayos X).

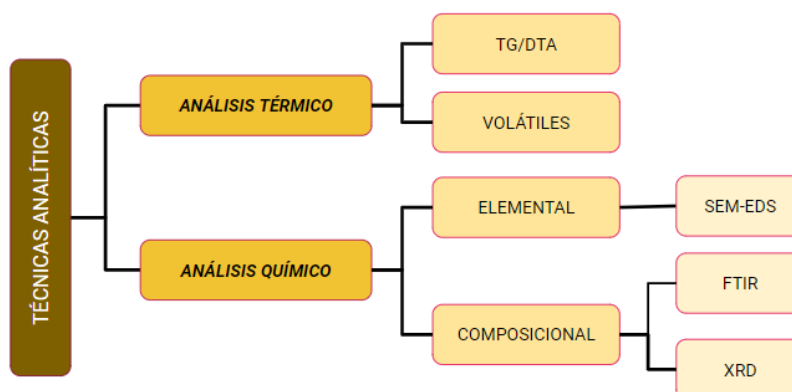


Imagen 14. Técnicas analíticas aplicadas.

Fuente: Imagen propia.

6.4.5. Ensayos de termogravimetría (DTA/TG)

La termogravimetría es una herramienta robusta que puede proporcionar mucha información sobre diversos materiales tales como biomasa lignocelulósica². Se puede utilizar, por ejemplo en presencia de nitrógeno(N₂), para entender el perfil de descomposición de una muestra en ausencia de oxígeno, en cambio, en presencia de aire sirve para ver la temperatura de inicio de la reacción de combustión(Biswas, B. et al., 2022).

En un análisis térmico diferencial (DTA) se somete a una variación de temperatura tanto a la muestra como a algún material de referencia, que es inerte desde el punto de vista térmico, físico y químico. El DTA mide la diferencia de temperatura entre la muestra y el material de referencia, en función del tiempo(temperatura constante) o la temperatura alcanzada en cada momento. Esta técnica permite detectar si se dan procesos endotérmicos o exotérmicos en la muestra de estudio e indica la temperatura a la cual tiene lugar estos cambios energéticos(Skoog et al., 2001).

Se realizaron dos ensayos de DTA/TG, para lo que se tomaron dos porciones diferentes de cada muestra, y se analizaron en distintas atmósferas. Primero se utilizó gas N₂, y después en aire. El rango de temperatura fue desde temperatura ambiente hasta los 950°, la velocidad de calentamiento fue de 10°C/min, el cambio de masa de muestra se mide automáticamente.

En este ensayo se empleó el Equipo de Análisis Térmico Diferencial y termogravimétrico marca NETZSCH.

6.4.6. Ensayos de Espectroscopía Infrarrojo (FTIR)

La espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) se puede utilizar para comprender los grupos funcionales presentes en la columna vertebral de la estructura macromolecular de la biomasa. Dependiendo de los grupos funcionales, las vibraciones se observan en números de onda típicos. Por lo general, la muestra sólida se prepara mezclándolo con KBr y luego se coloca para su análisis en una unidad FT-IR el escaneo el rango generalmente comienza desde 400 cm⁻¹ y sube a 4000 cm⁻¹(Yang et al., 2007; Marrugo et al., 2016).

Se prepararon pastillas a partir de polvo para el análisis mezclando la especie analizada con KBr puro, secado previamente en estufa. El producto en forma de pastilla se formó luego de presionar la mezcla a Presión de 10 MPa. Los espectros infrarrojos de absorción se registraron en el nivel básico entre 4.000-400 cm⁻¹ con una resolución de 2 cm⁻¹.

Para este ensayo se empleó un Espectrofotómetro FT-NIR Perkin Elmer Spectrum400(Imagen 15).

² Material que contiene tres tipos diferentes de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina.



Imagen 15: Pastillas de BrK y con las muestras a analizar. Espectrofotómetro FT-NIR Perkin Elmer Spectrum400.

Fuente: Imagen propia.

6.4.7. Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) permite la identificación cualitativa y semicuantitativa de compuestos cristalinos. Está basada en el hecho de que cada sustancia cristalina proporciona una figura única de difracción. La estructura cristalina consiste en la repetición periódica de los átomos que forman un sólido en las tres direcciones del espacio. La radiación de rayos X interaccionan con los electrones de la materia y da lugar a una dispersión. Si se trazan infinitos planos paralelos sobre la estructura tridimensional de un cristal, cada uno de ellos pasará por una serie de puntos. Si se coge uno de estos planos, a una cierta distancia existirá otro plano donde la distribución de puntos que corta será la misma, a la distancia entre estos dos planos se le llama distancia interatómica (d). Si hace incidir un haz de rayos X en la estructura, se generará el siguiente fenómeno observado en la Imagen 16.

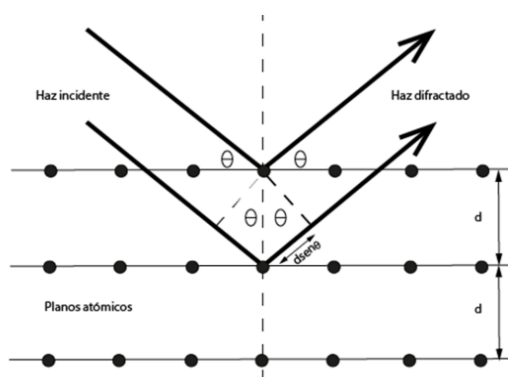


Imagen 16: Trayectoria del haz incidente y del haz difractado.

Fuente: Garrido, 2015.

Si la onda difractada por el primer plano lo hace con un ángulo θ , la onda difractada por el segundo plano también lo hace con un ángulo θ , si las ondas difractadas se encuentran en fase, se produce una interferencia constructiva y el haz es detectable, esto ocurre si la diferencia de recorrido entre las ondas es un múltiplo de la longitud de onda y se cumple la Ley de Bragg, con la siguiente ecuación:

$$2d * \sin\theta = n\lambda$$

Ecuación 9: Ley de Bragg para DRX.

Donde d es la distancia entre los planos de la red cristalina, θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión, n es un número entero y λ es la longitud de onda de los rayos X. Como cada familia de planos posee una distancia interplanar d , se detectan planos a diferentes ángulos, por lo tanto, los resultados serán característicos de la estructura que está siendo analizada pudiendo identificar qué fases componen la muestra en base a los picos de detección que son en realidad las reflexiones de los planos de cada fase (Garrido, 2015).

La celulosa es un componente cristalino de la biomasa y la pérdida de cristalinidad puede considerarse como una indicación de que la celulosa se ha descompuesto o convertido en productos después del procesamiento. Hay varios métodos disponibles para calcular la cristalinidad utilizando datos XRD. El ensayo se llevó a cabo en el equipo de difracción de rayos X Bruker, D8 Advance (Imagen 17).

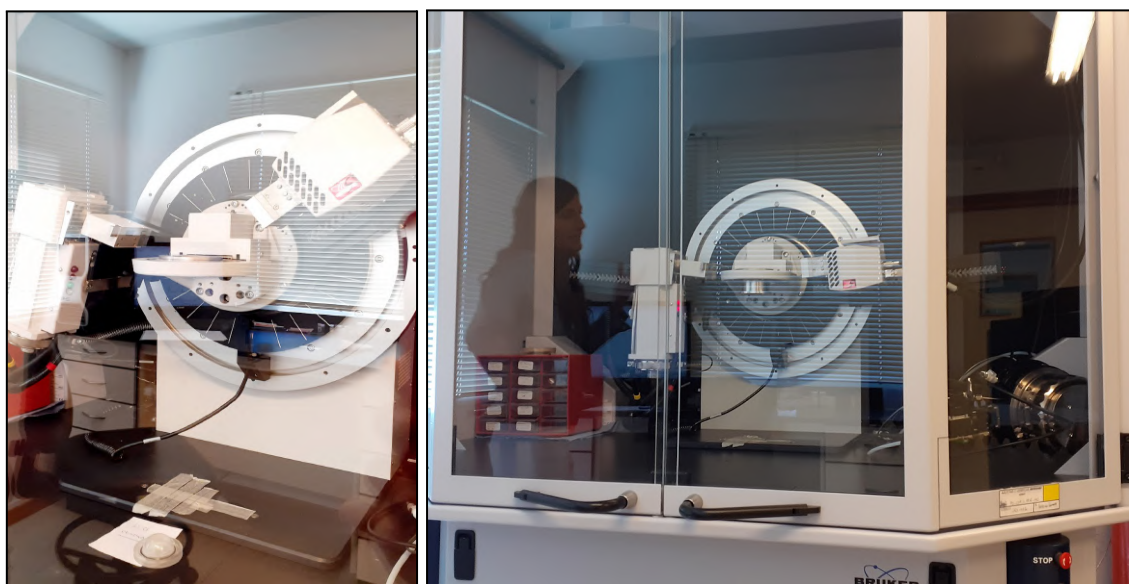


Imagen 17: Equipo de difracción de Rayos X para la determinación de fases cristalinas.

Fuente: Imagen Propia

6.4.8. Determinación de volátiles: análisis de gases de pirólisis por cromatografía

Se midió la concentración de dióxido de carbono, hidrógeno, metano y monóxido de carbono, provenientes de la descomposición de la biomasa para alta temperatura utilizando el cromatógrafo de gases (SRI Instrument - Modelo 8610C), como se indica en la Imagen 18. La descomposición térmica se realizó a 950 °C usando una velocidad de calentamiento aproximada de 32 °C/min. La masa dispuesta fue de aproximadamente 300 mg, y se colocó en una nave de cuarzo. Se empleó argón como gas carrier (gas portador).

La pirólisis es otro de los procesos termoquímicos que permite el aprovechamiento energético de la biomasa. Se trata de la descomposición térmica de un material en atmósfera inerte, dando lugar a tres fracciones distintas de productos: mezcla de gases (CO , CO_2 , H_2 e hidrocarburos ligeros como CH_4 , C_2H_2 y C_2H_3), un residuo sólido carbonoso (imagen 19) (char alrededor del 85%) y una fracción líquida recogida tras la condensación de los vapores orgánicos y del vapor de agua desprendidos de la biomasa (Alvarez, 2013).

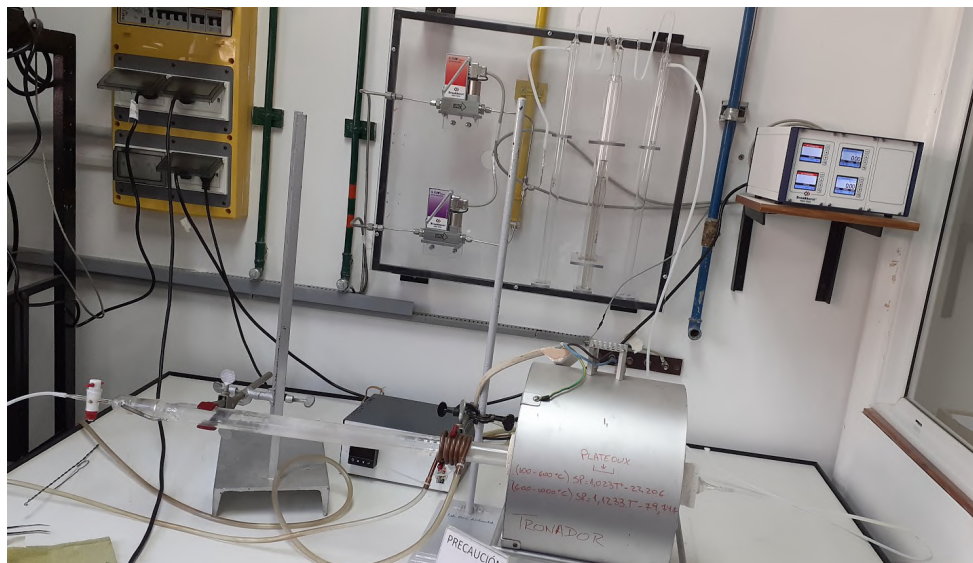


Imagen 18: Esquema de construcción para la determinación de volátiles.

Fuente: Imagen propia.



Imagen 19: Char obtenido luego de la pirólisis.

Fuente: Imagen propia.

Los volátiles se determinaron mediante esta ecuación:

$$\text{Volátiles}\% = 100 - \left(\frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 \right)$$

Ecuación 10: Porcentaje de volátiles por pirólisis

m_1 es la masa de la nave de vacía, (recipiente) en g;

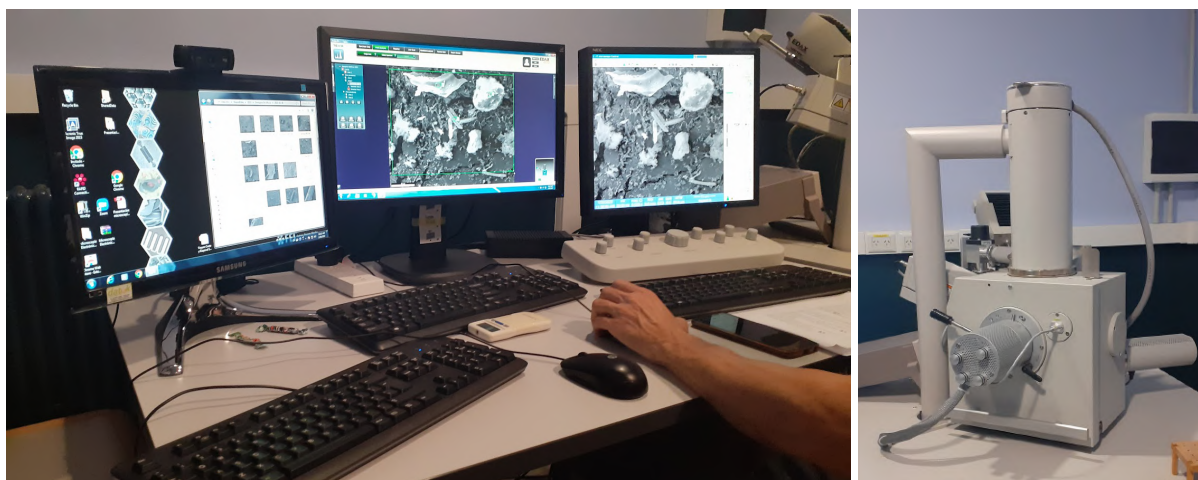
m_2 es la masa del recipiente y la porción de muestra, en g;

m_3 es la masa del recipiente de secado y el char en gr

6.4.9. Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (SEM-EDS)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) se basa en el barrido de la superficie de una muestra con un haz de electrones para observar un área determinada. Se utilizan lentes electromagnéticas para dirigir el haz de electrones hacia la muestra, barriendo la superficie y generando diferentes interacciones, lo cual permite obtener una imagen topográfica o composicional, dependiendo del detector utilizado. SEM se puede acoplar con un detector de rayos X de dispersión de energía (EDS), que permite un análisis elemental de las superficies a micro y nanoescala con resolución espacial altamente local, es decir, permite realizar el microanálisis de la superficie de una muestra, detectando todos los elementos de la tabla periódica excepto H, He y Li. En la microscopía electrónica de barrido la imagen se produce por la dispersión de los electrones. Las lentes son electromagnéticas y desvían las trayectorias de los electrones en el vacío. Los aumentos se consiguen variando la intensidad de la corriente, ésta produce un aumento del campo de fuerza y por lo tanto un desvío mayor o menor de los electrones. La profundidad de penetración del campo depende de varios factores como el tipo de muestra o la energía del haz (Garrido, 2015).

El equipo empleado en los ensayos es SEM FEI INSPECT S50 (Imagen 20).



*Imagen 20: Equipos de SEM.
Fuente: Imagen propia.*

7. Límites de emisión. Normativa

Límites establecidos por la normativa Internacional.

ARGENTINA

Ley N° 26.331 (2007) de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos, que lo que tiene como propósito proteger las especies de flora y fauna que habitan en ellos, prevenir las inundaciones, la erosión, los incendios, y evitar el avance de la desertificación, así como también garantizar que los bienes y servicios que ofrecen los

bosques, entre ellos la leña, continúen disponibles en el futuro, entre puntos centrales de la normativa.

Ley N° 22.351, Resolución N° 000011/94 (1994) Administración de Parques Nacionales. Reglamento Forestal para los Monumentos Naturales, Parques y Reservas Nacionales de la Región Andino Patagónica.

El presente Reglamento regula la protección y el aprovechamiento de los bosques en las áreas de jurisdicción de la Administración de Parques Nacionales, ubicadas en la región andinopatagónica. En el capítulo IV establece que en las Reservas Nacionales mencionadas en la ley, podrán otorgarse permisos de extracción de leña para consumo propio de los siguientes beneficiarios, con ajuste a las respectivas existencias, a las pautas de manejo de cada sector y a las condiciones.

NORMATIVA EUROPEA

Reglamento (UE) 2015/1185. Requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción local de combustible sólido.

El presente Reglamento establece los requisitos de diseño ecológico para la comercialización y puesta en funcionamiento de aparatos de calefacción local de combustible sólido con una potencia calorífica nominal igual o inferior a 50 kW. A su vez establece valores los cuales no se debe superar a partir del 1 de enero del 2022, de monóxido de carbono para los aparatos de calefacción local de combustible sólido (Tabla 2).

Norma europea Eco design 2022:

Establece los requisitos para un diseño ecológico, aplicable a todos los aparatos de calefacción local de combustible sólido diseñado para utilizar combustibles sólidos (biomasa), y a aparatos de calefacción local de combustible sólido que empleen fluidos para la transferencia de calor.

Quedan exentos de esta normativa todos aquellos aparatos de calefacción local de combustible sólido que utilicen biomasa no leñosa para la generación de calor.

Tabla 2: Requisitos de diseño ecológico de aparatos de calefacción local de combustible sólido de la norma Desing 2022 y Reglamento UE 2015/1185.

	Norma desing 2022	Reglamento UE 2015/1185 (O2 al 13%) Parte frontal abierta	Reglamento UE 2015/1185 (O2 al 13%) Parte frontal cerrada
Emisión de CO (mg/m3)	1500	2000	1500

Fuente: Climatic, 2021, Diario oficial de la Unión Europea, 2015.

CHILE

Decreto N°39. Establece norma de emisión de material particulado, para los artefactos que combustonan o puedan combustonar leña y pellet de madera(Tabla 3).

Tabla 3: Límite de emisión para estufas a pellets y/o leña.

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

Fuente: Decreto N°39 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile - Año 2014.

Decreto de Ley N° 701 (1974)

Regulación sobre la extracción de leña de origen nativo.

Establece la obligatoriedad de contar con un Plan de manejo para la intervención de los bosques con el objetivo de fomentar el uso racional del recurso y asegurar la reposición, preservación, mejoramiento y acrecentamiento de dichos recursos y su ecosistema.

En el año 2009 se crea la **Corporación Nacional de Certificación de Leña** con el objetivo de formalizar y regular el mercado, agregar valor al producto, mejorar la rentabilidad y sustentabilidad del manejo forestal, además de disminuir la contaminación del aire a partir del uso de leña con características establecidas. La certificación es una herramienta de mercado voluntaria para los productores de leña, que busca disminuir la venta informal, la evasión de impuestos, la contaminación del aire por uso de leña de baja calidad, además de impulsar la correcta entrega de información a los consumidores para su compra. Se establece como un requisito fundamental para una leña de buena calidad, que el contenido de humedad de este combustible sea inferior al 25%, puesto que cuanto mayor es el porcentaje de humedad, menor es el poder calorífico del mismo, además de que una elevada proporción de humedad en la madera empleada como combustible, predispone a la presencia de gases sin quemar y a la condensación de vapor de agua y de alquitrán por sobre las paredes del equipo de combustión causando incrustaciones. Además, la certificación sugiere que el diámetro de las trozas no supere los 16 cm y su largo se encuentre entre los 25 y 30 cm(Nuñez, 2014).

Norma Chilena Oficial N°2907 - 2005:

Se refiere a la Norma Chilena Oficial, NCh sobre Combustible sólido - Leña - Requisitos, declarada oficial por Resolución Exenta N°569, de fecha 13 de Septiembre de 2005.

Esta norma califica como leña húmeda a la que contiene más de un 25% de humedad en base seca y como leña seca aquella la que tiene menos o igual a 25%.

Norma Chilena Oficial N°2965 - 2005:

Se refiere a la Norma Chilena Oficial, NCh sobre Combustible sólido - Leña - Muestreo e Inspección, que establece los procedimientos de muestreo e inspección, que permiten verificar que un lote de leña cumple con los requisitos establecidos en NCh 2907 así como su clasificación en grado de calidad; declarada oficial por Resolución Exenta N° 569, de fecha 13 de Septiembre 2005.

8. Errores

El término error es sinónimo de incertidumbre experimental. Existen limitaciones instrumentales, físicas y humanas que causan una desviación del valor “verdadero” de las cantidades que se desean medir. Estas desviaciones son denominadas incertidumbres experimentales o errores en la medición. El valor verdadero es aquel que se obtiene si no existiesen errores en las mediciones, sin embargo esto es imposible. Se puede mejorar el procedimiento de medición pero jamás se puede eliminar el error. Entre las varias limitaciones de medición se tienen:

- La precisión y exactitud de los instrumentos de medición.
- La interacción del método de medición con el mesurando.
- La definición del objeto a medir.
- La influencia del observador que realiza la medición

En este trabajo se consideró 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 denominados intervalos de confianza. Estos nos ofrecen un rango de números que reflejan la incertidumbre en la estimación de un parámetro.

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 11: Error estándar.

Para este trabajo se optó por usar un intervalo de confianza del 95,4%, (media $\pm$ 2 errores estándares).

9. Resultados y Análisis

Ensayos de combustión:

La velocidad de combustión fue mayor en el Sauce, como se observa en en la Imagen 16 se consume 2,79 Kg en cada hora de tiempo transcurrida (estaría dentro de la categoría 3, según tabla 1), lo cual quiere decir que tiene mayor capacidad de combustión aprovechando a mayor velocidad el contenido de combustible. Por otro lado el de menor velocidad fue del

Pino Poderosa húmedo dando un valor de 1.05Kg/h, a su vez, es notablemente visible la diferencia con el pino ponderosa seco (Imagen 21) (estarían dentro de la categoría 2, según tabla 1).

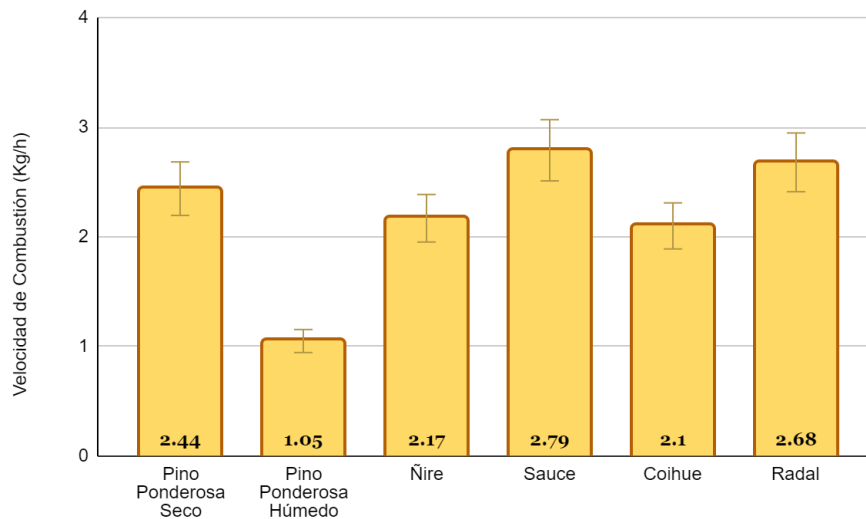


Imagen 21: Gráfica de velocidad de combustión promedio de cada una de las especies en estudio. Las barras indican el desvío estándar.

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra el comportamiento de cada especie, cuyos ensayos se hicieron por triplicado, los cuales se promediaron y se determinó el desvío estándar.

En la imagen 22 se puede observar el comportamiento de cada uno de los ensayos realizados de pino ponderosa y la variación de la temperatura de los gases.

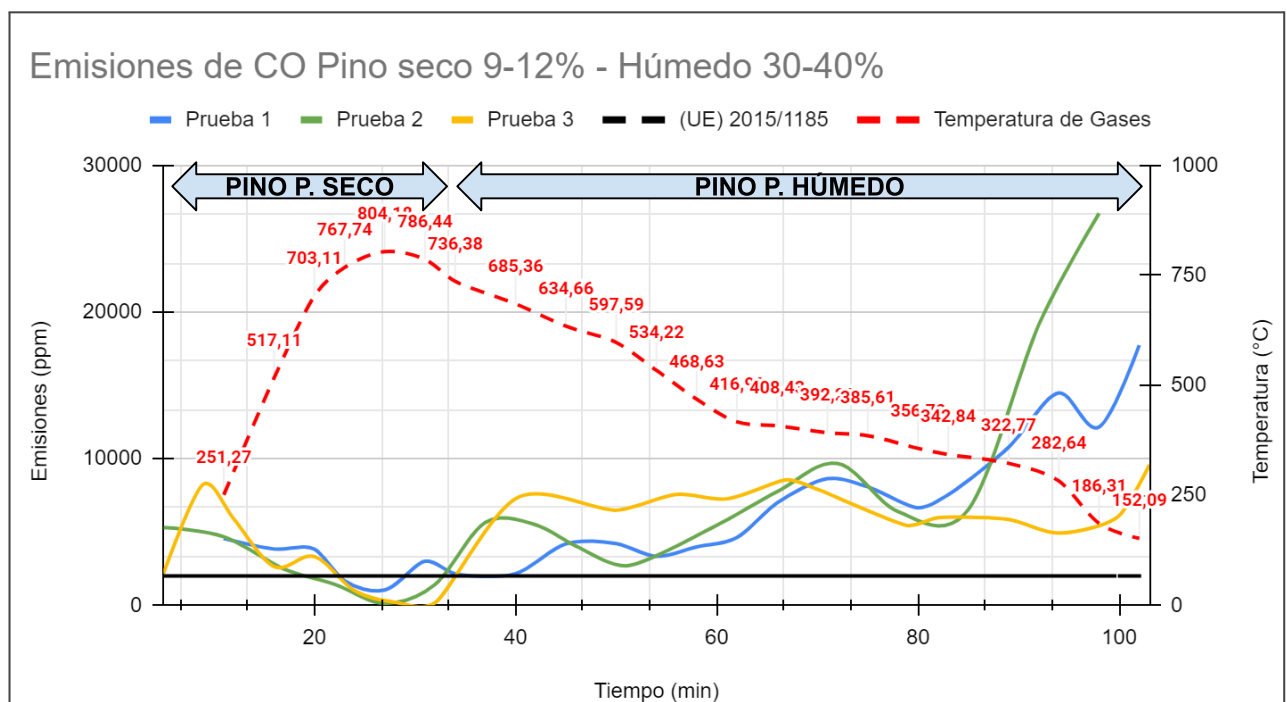


Imagen 22: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 8 y 16% de humedad con un promedio de las temperaturas de gases.

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la imagen 22, durante los primeros 25 min desde el inicio de la combustión se observa un aumento de la temperatura y una disminución de las emisiones de CO. En caso contrario, a los 40 min aproximadamente, cuando se ha consumido gran parte de la leña, va disminuyendo la temperatura y aumentan las emisiones. Cuando se le agrega leña húmeda a los 30 min, la temperatura disminuye lentamente manteniéndose durante un tiempo más prolongado.

Cuando usamos leña seca, la temperatura de combustión se eleva rápidamente se observa una llama más viva y envolvente ocupando toda la cámara de combustión (Imagen 23.a). Cuando quemamos leña húmeda, la llama es más débil, tarda más tiempo en consumirse, produce hollín, se acumula más suciedad y emite concentración de humos (Imagen 23.b).



Imagen 23: a.) Pino ponderosa seco (izquierda), b) Pino ponderosa húmedo (derecha).

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la imagen 24 hasta la 26 para la emisión de CO y sus correspondientes desviaciones se realizó una comparación con el Reglamento UE 2015/1185. Los límites de esta normativa estaban corregidos al 13% de O₂ y para mantener un criterio uniforme en todas las comparaciones, todos los valores obtenidos de las mediciones de emisión se corrigieron al mismo porcentaje de oxígeno.

Se construyeron los intervalos de confianza de 95% (Imagen 24 al 26) para las tres etapas de la combustión, precalentamiento, máxima temperatura (llama viva) y enfriamiento. Los puntos que se observan en las figuras son los valores del límite inferior, media y límite superior de los intervalos. Es importante mencionar que para poder hacer el ensayo de combustión con el pino húmedo (etapa de precalentamiento) fue necesario iniciar el fuego con pino ponderosa seco, razón por la cual las mediciones al inicio pueden que discrepan del valor real.

Intervalo de confianza al 95.4% para CO - Etapa de precalentado

---Límite (UE) 2015/1185

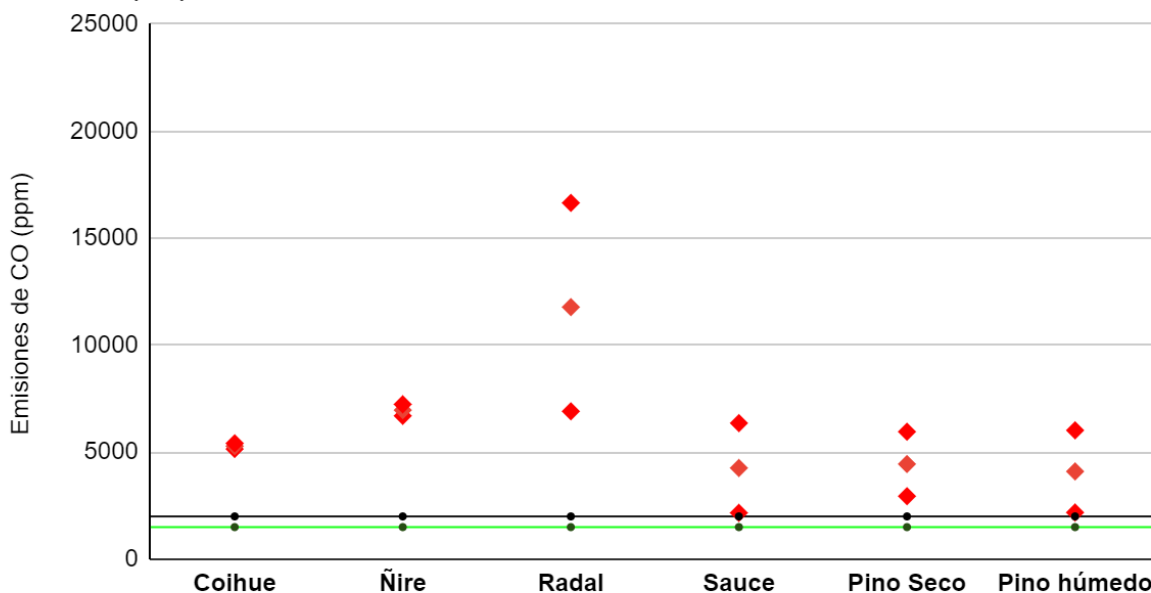


Imagen 24: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de precalentado (10-12 min desde el encendido)

Fuente: Elaboración propia

Intervalo de confianza al 95.4% para CO - Etapa de Temp. máximas

---Límite (UE) 2015/1185

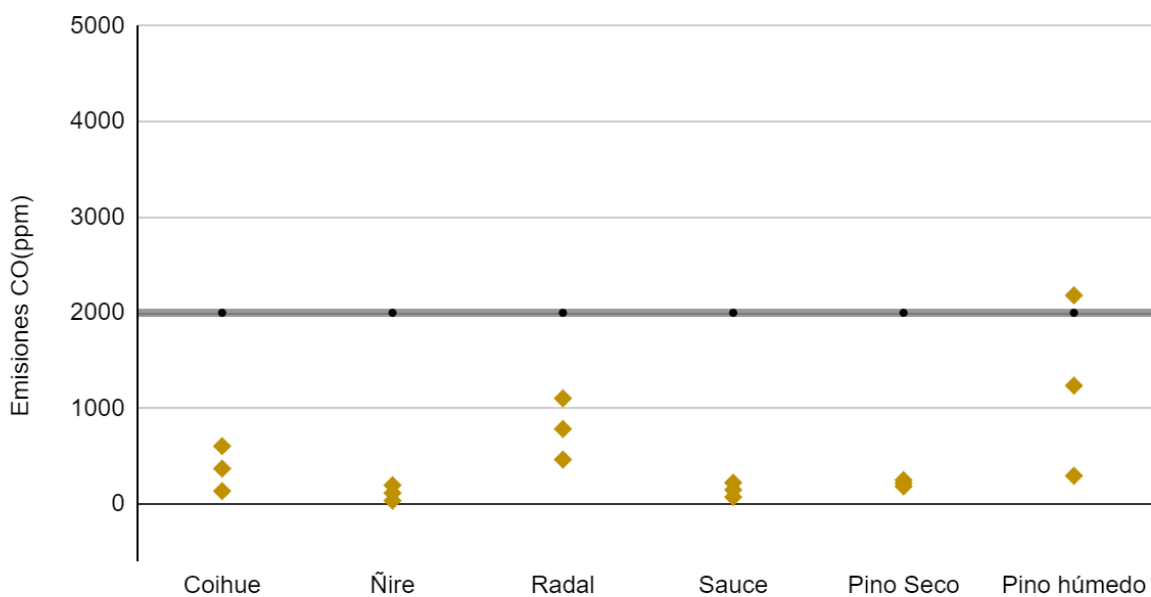


Imagen 25: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de mayor temperatura (a los 35-40 min desde el encendido)

Fuente: Elaboración propia

Intervalo de confianza al 95.4% para CO - Etapa de Enfriamiento

---Límite (UE) 2015/1185

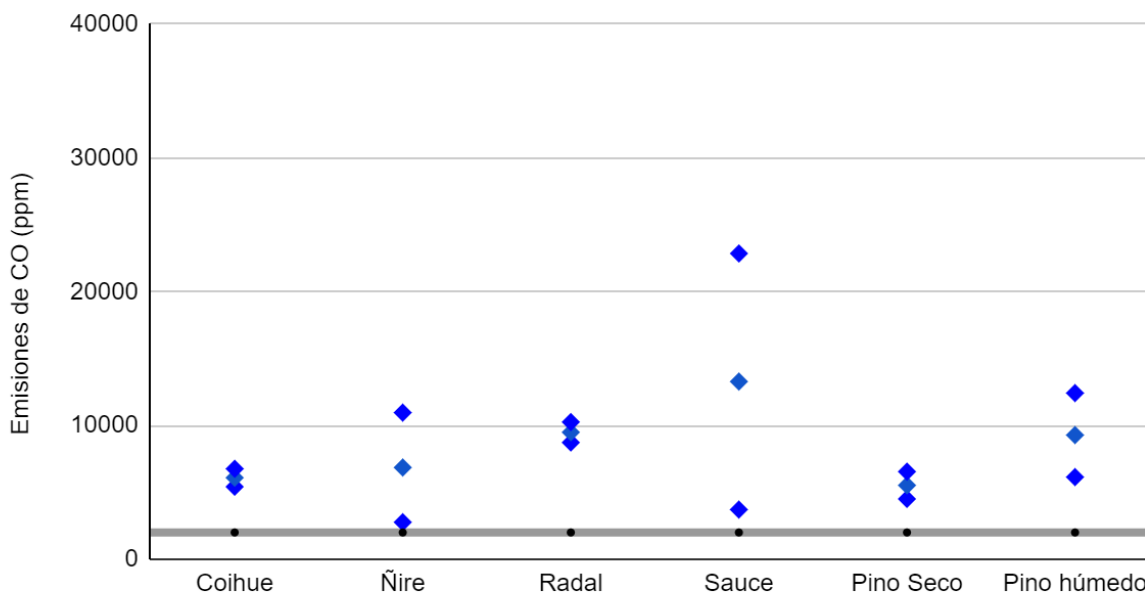


Imagen 26: Intervalos de confianza de 95.4% para la concentración de CO para cada una de las muestras durante la etapa de mayor temperatura (a los 55-60 min desde el encendido)

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los intervalos de confianza contruidos, se puede asegurar todas las especies durante la etapa de precalentado y enfriamiento superan el límite establecido por Reglamento UE 2015/1185, en cambio, en la etapa de mayor temperatura de la combustión(llama viva) la mayoría de las especies se encuentran por debajo de valor de la norma. Algunos valores del pino ponderosa húmedo están por encima del límite establecido por la norma, lo que nos da indicio que su uso no es favorable.

Como se observó en la Imagen 22 la temperatura es otra de las variables fundamentales en el proceso de combustión. A continuación se muestran las temperaturas promedios alcanzadas para cada especie(Imagen 27). De manera general las especies presentan un máximo alrededor de los 20 a los 40 minutos desde el inicio del fuego. Dentro de las especies, la de ponderosa seca es la que mayor temperatura alcanza, superando los 800°C. Mientras que la de Radal junto con la de coihue llegan a temperaturas más bajas alrededor de 500°C.

Si bien la de pino húmedo presenta una temperatura inferior a la de pino seco, sus valores son superiores a la del resto de las especies. Esto puede deberse a que para poder quemar pino húmedo es necesario iniciar el fuego con leña seca, de esta manera logramos calentar la cámara de combustión, una vez introducidos los leños húmedos aceleramos el proceso de secado para que minutos más tarde logré prender.

Temperaturas de gases en la salida de la estufa

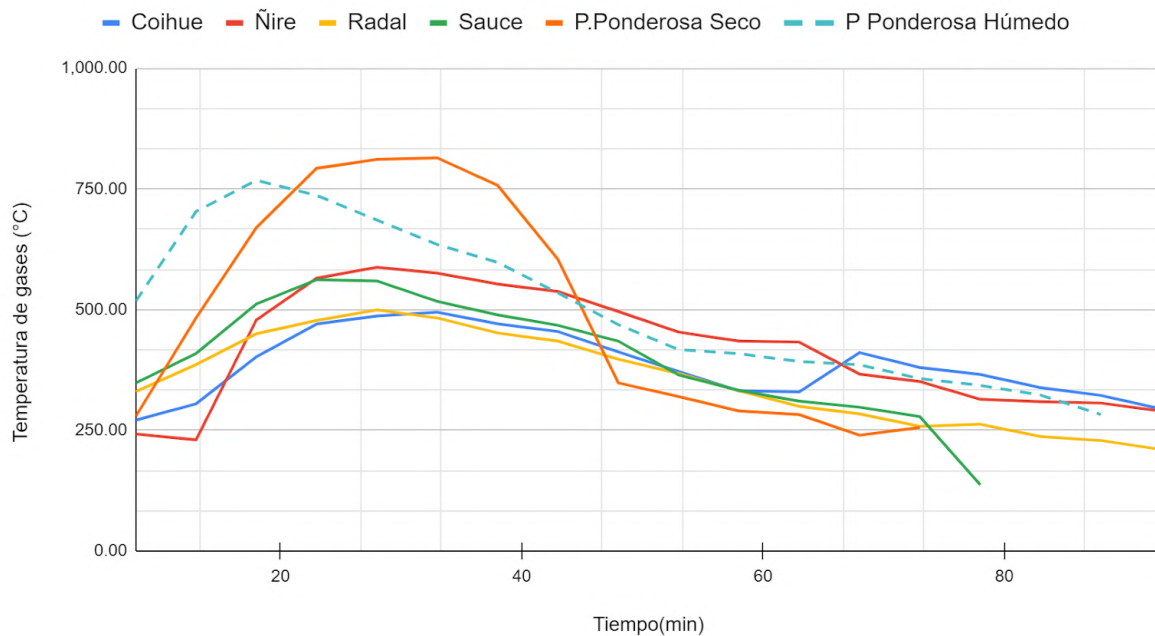


Imagen 27: Temperatura de gases de cada una de las especies durante la combustión
Fuente: Elaboración propia

Una elevada eficiencia implica un menor gasto energético y un mayor aprovechamiento del calor y se considera la forma más rentable de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Se alcanza mayor eficiencia energética si se controla el nivel de humedad del material. El humo también representa una pérdida de eficiencia, porque contiene una gran parte de la energía presente en la madera.

La imagen 28 presenta los porcentajes de eficiencia para cada una de las muestras en el periodo de tiempo de máxima temperatura. Las que mejor eficiencia presentaron entre el 70- 80% es el Radal, el sauce y coihue. En cambio, el pino ponderosa seco, es el que menor eficiencia dió, esto puede deberse a que las pérdidas por chimenea(qA) fueron mayores con respecto a las otras especies. Una de las razones puede ser porque el equipo detectó porcentajes muy bajos de CO₂(Ecuación 8), por lo tanto al momento de realizar el cálculo automático muestra eficiencias más bajas.

Eficiencia desde los 20 a los 40 min

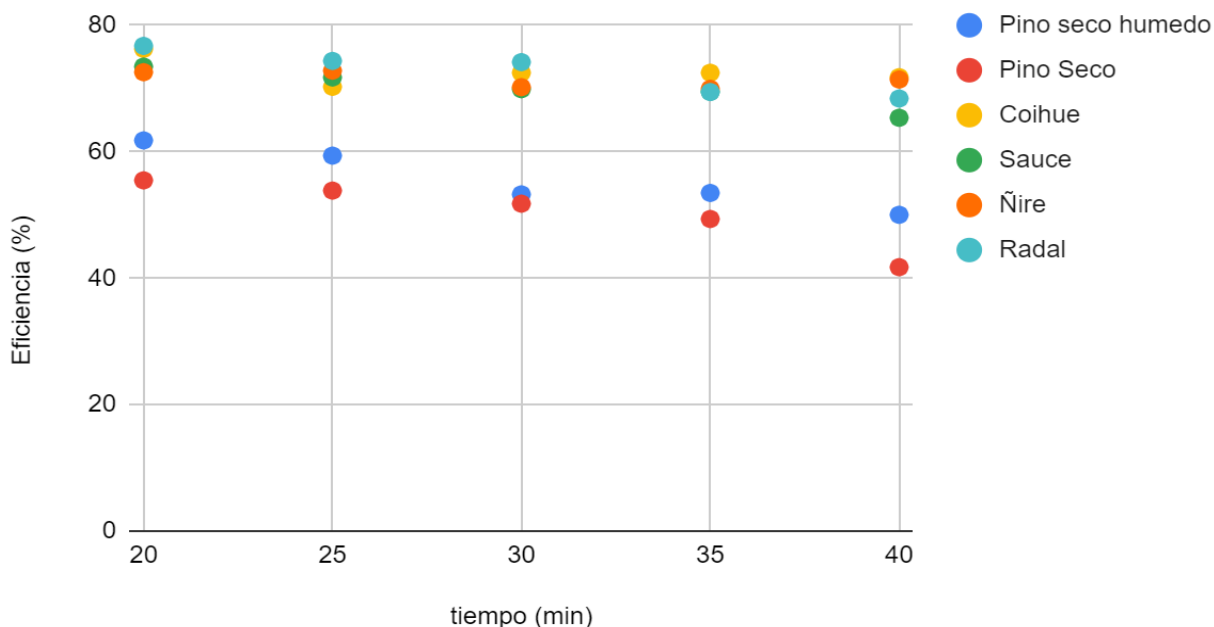


Imagen 28: Eficiencia de las diferentes especies en estudio desde los 20 a los 40 min

Fuente: Elaboración propia

Técnicas analíticas:

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de humedad, densidad y contenido de cenizas (Tabla 4). La expresión de la determinación de carbón fijo corresponde al porcentaje de biomasa que no forma parte de los compuestos volátiles ni cenizas en una muestra.

Tabla 4: Humedad, contenido de cenizas, densidad y volátiles de cada una de las muestras analizadas con su correspondiente desvío estándar.

Espece	Humedad (%) (formato leña)	Densidad (Kg/m3) (formato leña)	Contenido de cenizas (%) (en base seca)
Radal	51,3 ± 0,16	614,32 ± 9,54	0,55 ± 0,01
Sauce	51,4 ± 0,78	602,57 ± 5,47	0,56 ± 0,01
Ñire	46,6 ± 4,02	878,91 ± 36,19	0,56 ± 0,02
Coihue	46,4 ± 1,24	645,84 ± 19,60	0,38 ± 0,06
Pino	55,4 ± 0,16	943,25 ± 39,39	0,38 ± 0,01

Fuente: elaboración propia.

A continuación en la tabla 5 aparece reflejada la cantidad de materia que se descompone térmicamente, denominada materia volátil, las cenizas y el carbono fijo, el cual ha sido determinado como la diferencia entre la biomasa inicial y el sumatorio del resto de fracciones.

La tabla 5 sintetiza los resultados de PCS y los valores calculados de PCI para las distintas muestras mediante la Ecuación 4. Los valores del poder calorífico varían desde 4384,80 a 4661,57 Kcal/kg de biomasa.

Tabla 5: PCS y PCI calculado en base a la ecuación 2 de cada una de las muestras analizadas.

Especie	Humedad (%) (formato aserrín)	PCS (Kcal/Kg)	PCI (Kcal/Kg)	Volátiles (%)	Carbón fijo (%)
Radal	4,40± 0,06	4453,15	4152,55	81,78	18,22
Sauce	4,70 ± 0,07	4661,57	4370,82	81,54	18,46
Ñire	4,24 ± 0,06	4507,17	4241,06	81,69	18,31
Coihue	4,40 ± 0,07	4384,80	4094,05	82,40	17,60
Pino	5,40 ± 0,06	4507,17	4181,92	82,25	17,75

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados indican que el sauce, ñire y pino son mucho más energéticos porque sus PCS y PCI son levemente más elevados que el resto de las especies.

Uno de los factores que pueden afectar el poder calorífico y, por ende, la eficiencia y el proceso de conversión, es el contenido de humedad. La presencia de humedad significa una disminución del poder calorífico de la madera, ya que se requiere un consumo de calor para evaporarla (Patiño, 2008). A mayor contenido de carbono mayor es el poder calorífico.

Ensayos de termogravimetría (DTA/TG):

Pueden observarse en los gráficos de variación de la masa vs temperatura los porcentajes de pérdida de masa en cada intervalo señalado.

Mediante las curvas de TG en Nitrógeno se puede estimar el contenido de humedad y volátiles de todas las muestras ensayadas, y con las curvas de TG en aire, el contenido de cenizas y el carbono fijo se ha evaluado por diferencia (Giraldo, et al., 1999) (Tabla 6).

Al graficar los datos de masa versus temperatura, generalmente se observan tres regiones distintas para la mayoría de las biomásas. La primera región generalmente pertenece a la eliminación de humedad, y la segunda, se debe a la descomposición de la materia orgánica y la última, se debe a la descomposición secundaria reacciones o reacciones relacionadas con el carbono enlazado.

En el Anexo I, se representan las curvas de variación de la masa con la temperatura (TG) y su (DTA) de las 5 biomásas (en atmósfera inerte de nitrógeno y de aire).

Como se puede observar, en la curva de pérdida de masa, existe una pequeña pérdida para todas las biomásas en el intervalo de temperatura de 20 a 200 °C, la cual es debida a la humedad de las muestras, y que por lo tanto, no se contabilizó como materia que se descompone térmicamente de la biomasa. Luego hay, una segunda pérdida hasta los 311 °C

asignada a la hemicelulosa, y, finalmente, una pérdida de masa de hasta 502 °C asignada a la celulosa y la lignina (para dar finalmente CO₂, H₂O y cenizas).

En los diagramas de DTA de todas las muestras es posible reconocer un pico endotérmico en los 400-420°C y 2 picos exotérmicos uno en 340-360°C y el otro en 460-480°C, estos últimos son atribuidos a la descomposición de la celulosa y lignina respectivamente.

La combustión de hemicelulosa ocurre a temperaturas más bajas debido a su estructura lineal con cadenas laterales cortas. La celulosa y la lignina tienen estructuras más complejas y fuertes, con disposiciones asociadas y compuestos aromáticos, por lo que tienen mayor resistencia al calor (Simón et al, 2020).

La tabla 6 muestra los valores de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo que se pueden extraer desde la observación de los gráficos. Los valores de humedad dieron diferentes a los de los ensayos de humedad que se hicieron al principio y esto puede deberse a que se hicieron en diferente fecha y eso pudo interferir en el resultado final (el material se puede rehidratar). Asimismo, los porcentajes de volátiles fueron menores a los obtenidos en el ensayo de determinación de volátiles, esta diferencia puede ser debida al error que se genera al momento de trabajar con distintas masas, en TG/DTA se emplean alrededor de 10mg y en Determinación de volátiles 300mg (masa inicial).

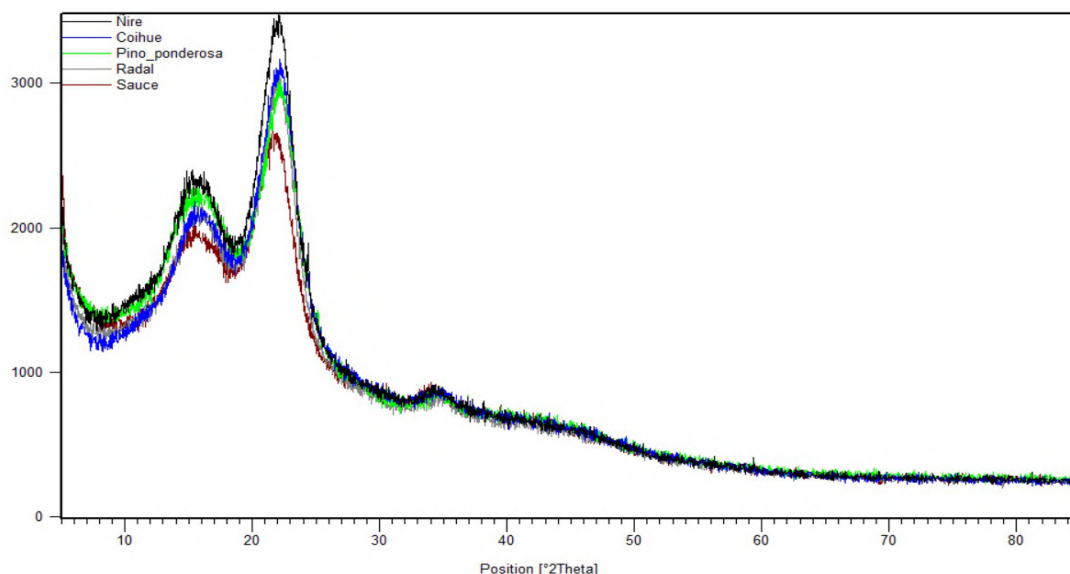
Tabla 6: Porcentajes de humedad y volátiles obtenidos desde los gráficos del Anexo I, de atmósfera inerte.

	Coihue	Ñire	Radal	Sauce	Ponderosa
Humedad (%)	2,1	2,0	2,2	1,5	3,0
Volátiles(%)	81,1	77,6	76,3	77,9	72,6
Cenizas (%)	0,5	0,5	0,2	0,8	0,7
Carbono fijo (%)	18,4	21,9	23,5	21,4	26,6

Fuente: Elaboración propia.

Difracción de Rayos X:

Tal como lo indica Segal, et al (1959) el patrón DRX de la biomasa se caracteriza por un halo amorfo intensivo con un máximo importante entre 20 y 23° y un máximo menor entre 13 y 17°, lo que significa la presencia de celulosa (Imagen 29).



*Imágen 29: Difractograma de Rayos X de biomasa de distintas especies en estudio.
Fuente: Imagen propia.*

Se detectó una fase amorfa en todas las cenizas de las muestras estudiadas. Se detectó calcita en una de las cenizas, es decir que estaba enriquecida con calcio. Se detectó hidroxiapatita y Cristobalita en la mayoría de las biomásas, el primero es un mineral y un material biológico formado por fosfato de calcio cristalino y la segunda es un óxido de silicio. También en algunas de las muestras se detecta periclase, esta es la forma mineral del óxido de magnesio.

La presencia de estos minerales se detectaron a través de diversos picos, los cuales están identificados con un color y se puede visualizar en el Anexo III.

Ensayos FTIR:

Los resultados obtenidos por FTIR para cada una de las biomásas en formato aserrín y en ceniza son mostrados en la imagen 30, 31 y 32 respectivamente. La asignación de las bandas fundamentales que corresponden a las vibraciones características de los componentes principales, los mismos se pueden visualizar en la Tabla 6.

En dicha tabla se pueden identificar varias bandas asociadas a los grupos funcionales de los componentes mayoritarios de todas las biomásas y se observa en la zona de más alta energía la banda intensa y ancha relacionada con agua no enlazada y los grupos O-H, como fue identificado.

Tabla 7: Asignación de bandas características para los espectros de infrarrojo de las muestras analizadas.

	Frecuencia experimental (cm-1)	Asignación	Polímero asociado
1	3380	Enlace O--H	Lignina - Grupos alcoholicos - grupos funcionales carboxílicos y enlaces de hidrógeno
2	2930	vibración C--H	Lignina - Grupos funcionales y alargamientos -CH ₂ y CH ₃
3	1738	Enlace C=O Cetona y aldehído	Hemicelulosa - Sistemas conjugados y no conjugados(carbonilo/carboxilo)
4	1600	Anillo aromático C=O	Lignina
5	1500	anillo aromático	Lignina
6	1375	Vibración C--H	Hemicelulosa, celulosa y lignina
7	1230	Vibración C--H	Lignina
8	1170	C-O-C	Hemicelulosa, celulosa y lignina

Fuente: Imagen propia.

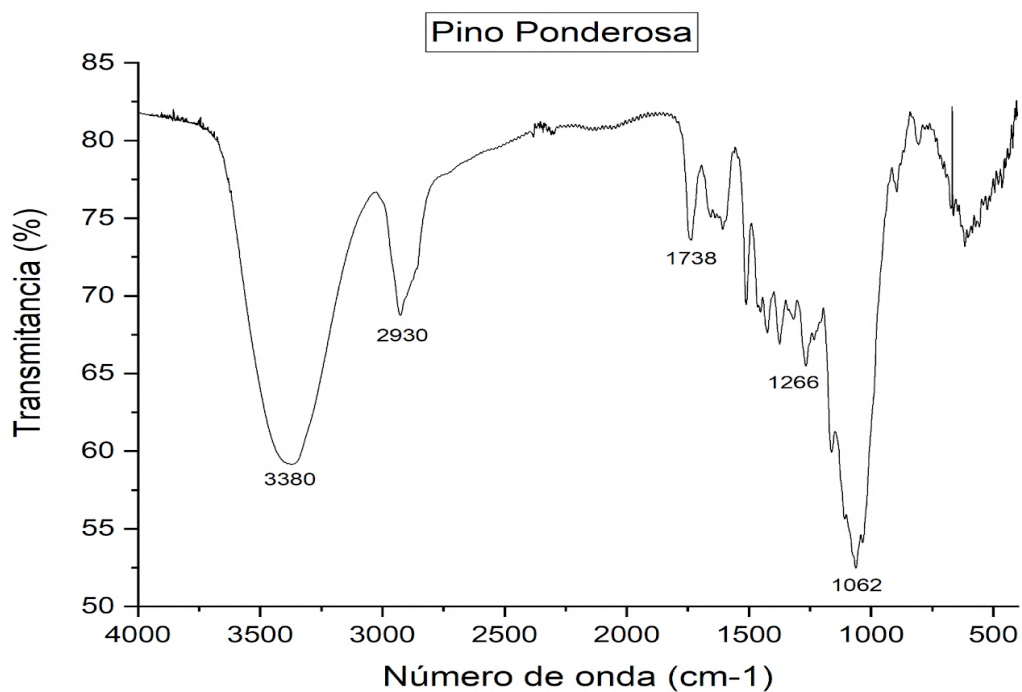


Imagen 30: Espectro infrarrojo de pino ponderosa

Fuente: Imagen propia.

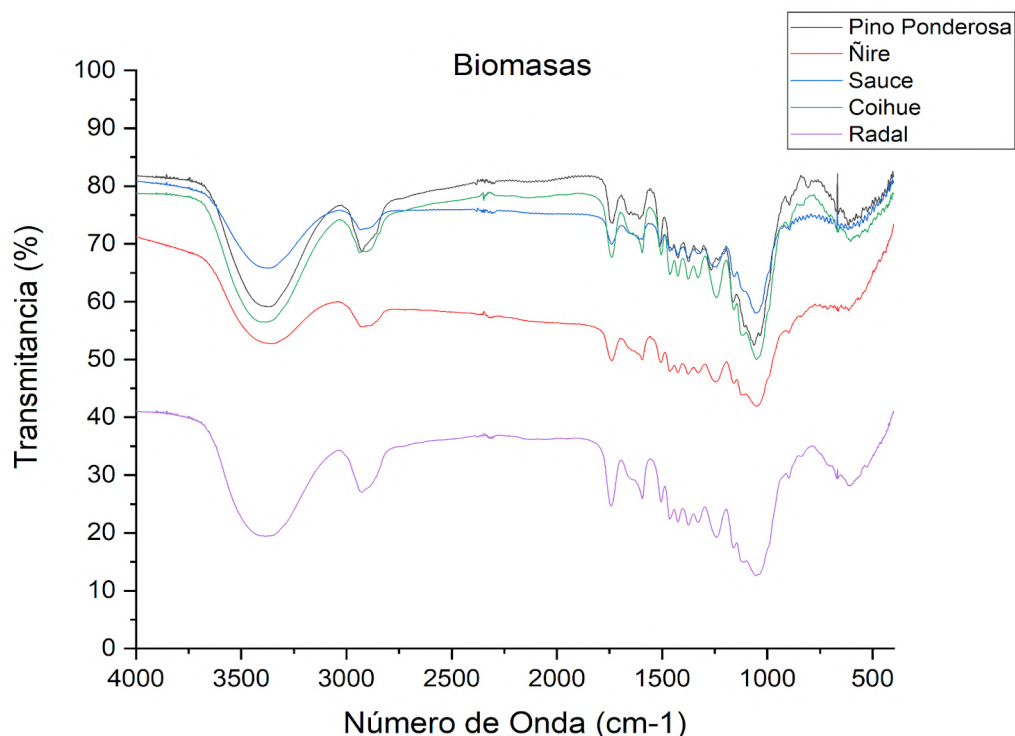


Imagen 31: Espectro infrarrojo de las biomásas de Pino P, Ñire, Sauce, Coihue y Radal.

Fuente: Imagen propia.

Los espectros FTIR indicaron que las cenizas de biomasa estudiadas tenían un tipo similar de enlaces superficiales (imagen 32).

Tal como menciona Šupić, S. et al (2021) en su trabajo en los espectros se pueden visualizar diversas bandas características de las cenizas de biomasa. Una banda espectral entre 1380 y 1450 cm^{-1} es característica de la vibración de estiramiento asimétrica del grupo $\text{C}=\text{O}$, lo que sugiere la presencia de compuestos de carbonato en las muestras. La banda más intensa observada para todas las cenizas se encuentra aproximadamente entre 1000 y 1100 cm^{-1} y se atribuye a las vibraciones de estiramiento asimétricas del $\text{Si}(\text{Al})-\text{O}$ en las fases de sílice y aluminosilicato. Esta banda proporciona información sobre el grado de cristalinidad/amorfismo de una muestra. La presencia de sulfato de calcio en forma de anhidrita puede ser confirmada por la banda de vibración que aparece en 604 cm^{-1} . Los valores de banda por debajo de 500 cm^{-1} característicos para todas las muestras indican la presencia del grupo funcional $\text{Si}-\text{O}$.

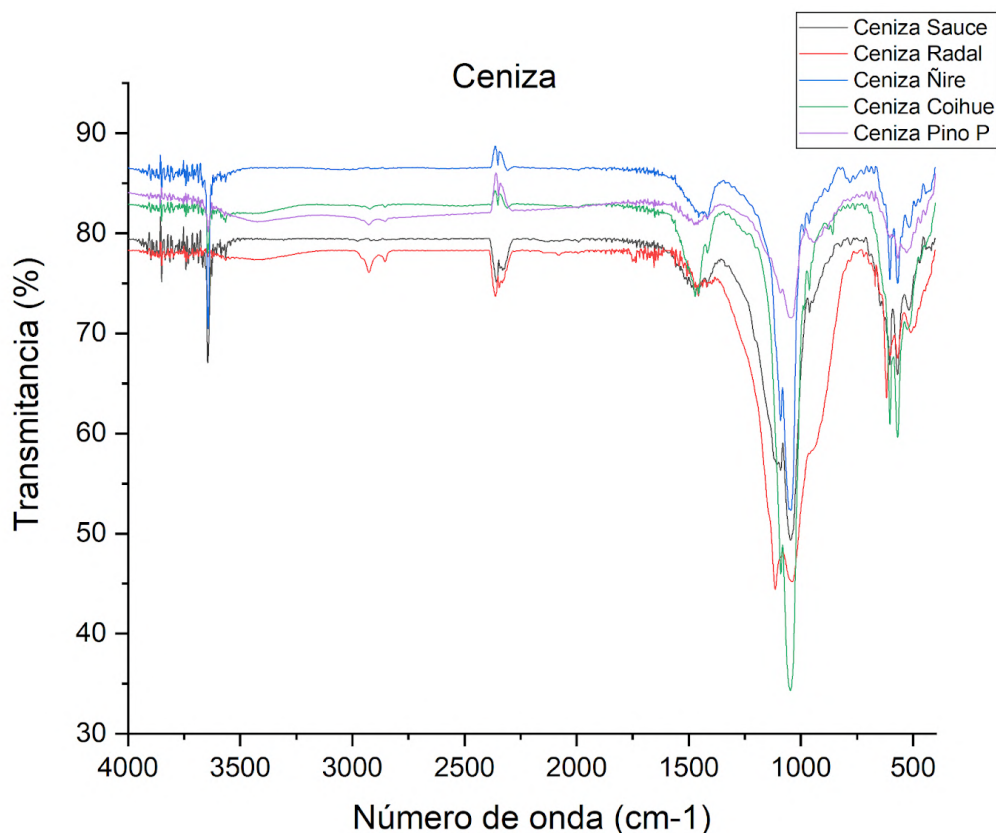
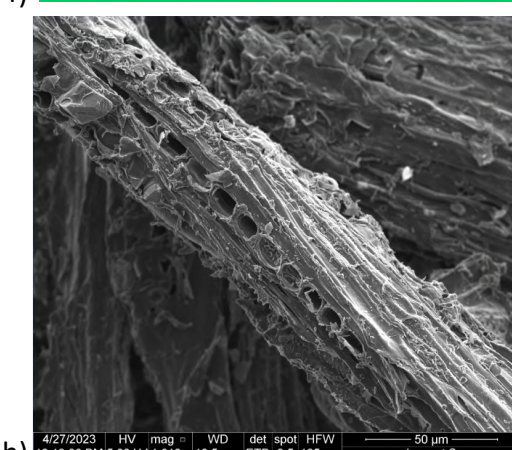
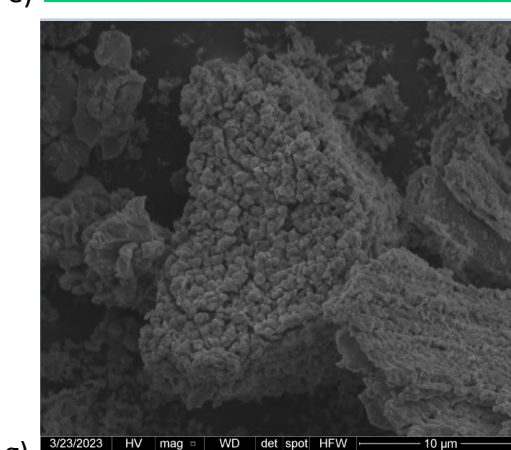
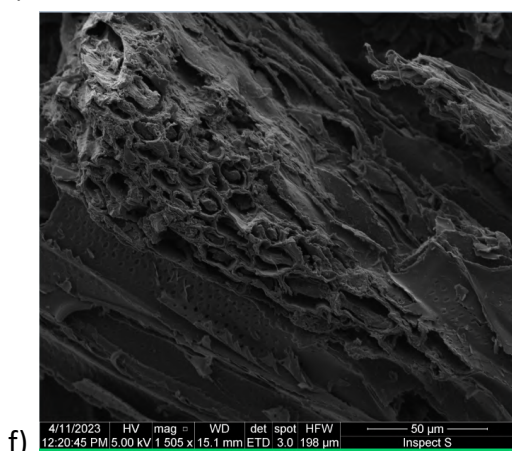
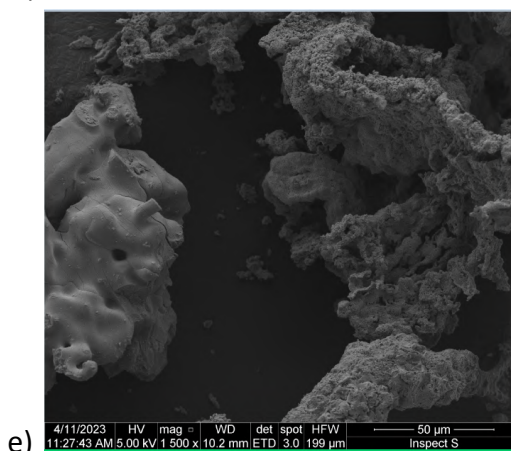
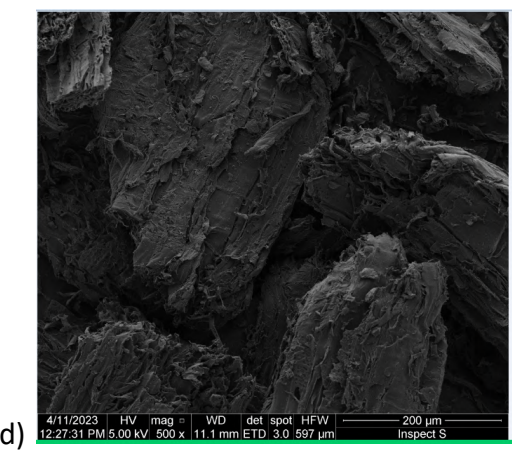
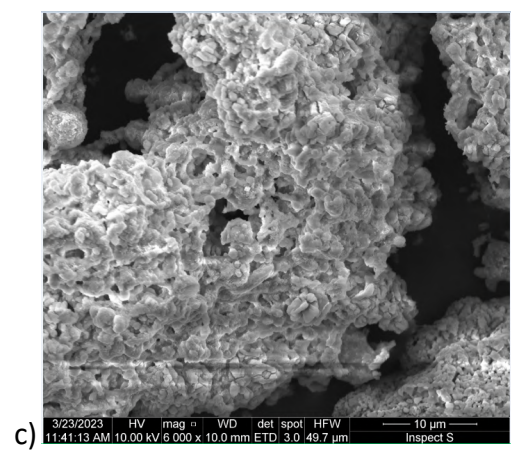
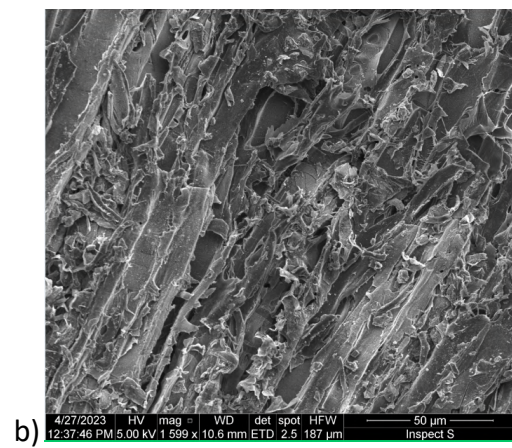
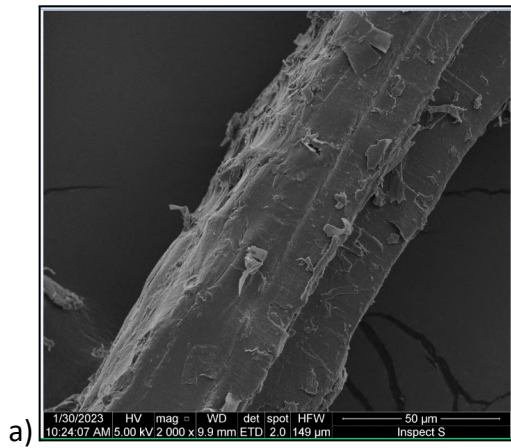


Imagen 32: Espectro infrarrojo de las cenizas puras de Pino P, Ñire, Sauce, Coihue y Radal.

Fuente: Imagen propia.

SEM - EDS

En la superficie de la muestra tienen lugar una serie de fenómenos físicos además de las interacciones electrónicas utilizadas para la formación de imágenes. Es posible aprovechar estas interacciones para obtener información química. A medida que se generan electrones secundarios para la obtención de imágenes, el átomo interactuado se ioniza y debe capturar un electrón en la capa exterior para volver a la capa fundamental. Según la ley de conservación de la energía, se emite un fotón que es característico de la transición de la capa que se produjo y se “cuantifica” según lo definido por las reglas de la mecánica cuántica. Medimos la energía de ese fotón emitido y esencialmente “buscamos” las transiciones de energía que ocurren para cada elemento. El detector EDS es la herramienta que utilizamos para medir la energía de los fotones emitidos en el espectro electromagnético de rayos X.



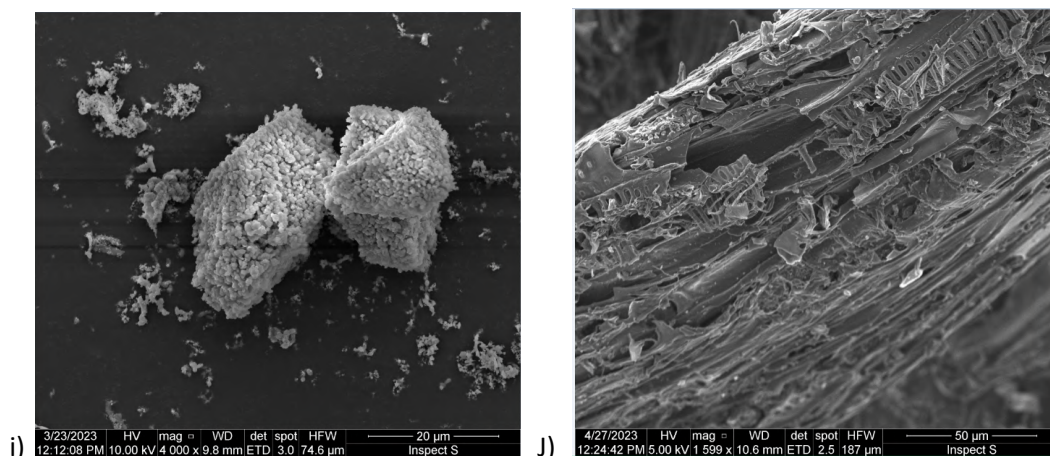


Imagen 33: Imagen de microscopía SEM de muestras de todas las especies en estudio. a y b) Ceniza pino ponderosa (izquierda) Char de pino ponderosa (derecha). c) y d) Ceniza de Sauce (izquierda), char de Sauce (derecha) e) y f) Ceniza de radial (izquierda), char de radial (derecha) g) y h) Ceniza de Ñire (izquierda), char de Ñire (derecha) i) y j). Ceniza de Coihue (izquierda), char de coihue (derecha).
Fuente: Fuente: Valores aportados por el Dpto. de Fisicoquímica y Control de Calidad CNEA, 2023.

La imagen 33 muestra la morfología y la estructura de muestra de todas las cenizas de biomasa. A la izquierda corresponde al fuste, pretratado a 950°C en un horno vertical y a la derecha fuste que sufrió una descomposición térmica también a 950°C en ausencia de oxígeno.

En el anexo II se pueden visualizar las imágenes de todas las cenizas y los char de todas biomasa de estudio con su correspondientes gráficos en donde figuran los elementos predominantes (Tabla 8). Se observan superficies lisas, rugosas en las muestras de cenizas y en el char más bien porosas. Los productos gaseosos y otros volátiles deben pasar por los poros desde el interior de la partícula hasta la superficie exterior.

Tabla 8: Composición elemental de las cenizas y del char de cada una de las muestras de biomasa.

Ceniza (%)											
Especie	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Mn
Ponderosa		36.49		6.94	0.47	9.56	2.00	0.46	0.73	43.36	
Sauce		39.69	0.63	12.44	0.05	0.13	7.26	3.08	3.21	33.38	
Ñire		39.89		0.25				3.48		56.57	
Coihue		41.01		16.93			11.42	0.64	0.16	29.84	
Radal		38.46	0.63	0.99		0.45	4.82	4.38	8.33	32.10	9.84
Char (%)											
Ponderosa	89.69	8.66		0.14	0.08				0.24	1.19	
Sauce	91.97	6.22					0.41		0.64	0.75	
Ñire	92.99	5.93		0.07	0.07		0.21		0.16	0.56	
Coihue	93.75	4.92		0.12	0.08		0.13		0.59	0.41	
Radal	89.29	8.18		0.21			0.72		1.59		

Fuente: Valores aportados por el Dpto. de Fisicoquímica y Control de Calidad CNEA, 2023.

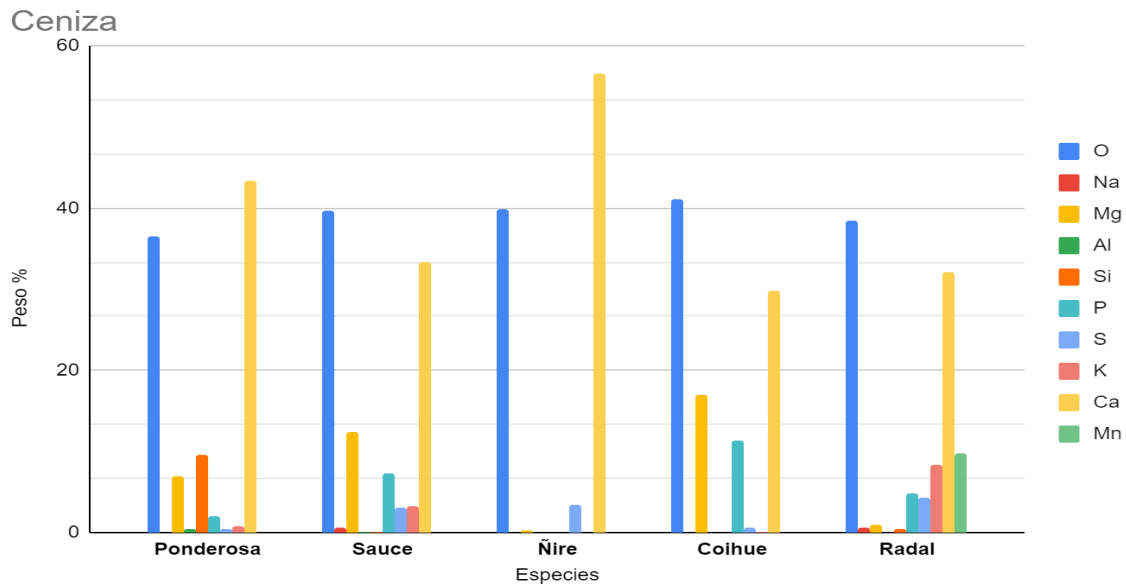


Imagen 34: Gráfico de composición elemental de las Cenizas de las biomásas obtenidas por SEM -EDS.
Fuente: Imagen propia.

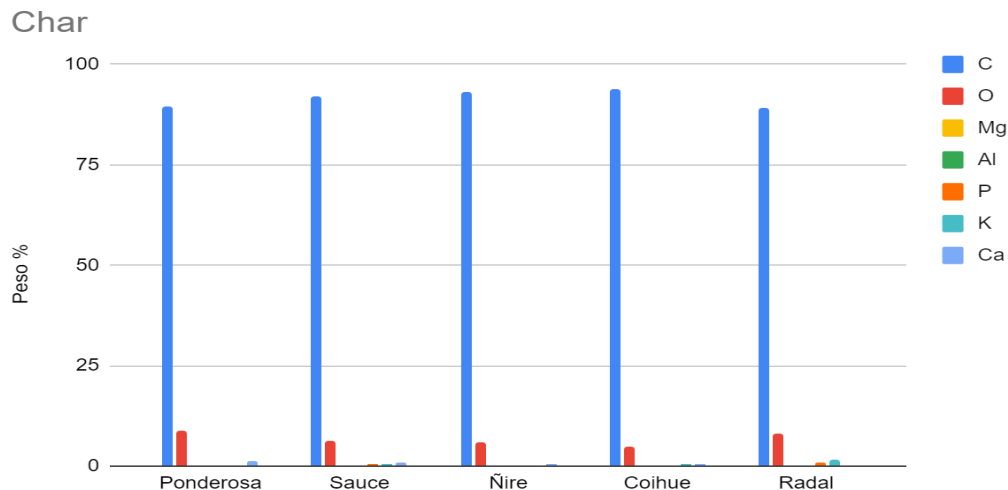


Imagen 35: Gráfico de composición elemental del char de las biomásas obtenidas por SEM -EDS.
Fuente: Imagen propia.

Los análisis revelaron que las composiciones químicas de las cenizas están dominadas principalmente por oxígeno, calcio y magnesio (Imagen 34) y las de char de Carbono y de oxígeno (Tabla 8) (Imagen 35).

Los valores de Azufre observados fueron bajos en todas las especies, sugiriendo un bajo riesgo de emisiones de óxidos de azufre en la combustión de la biomasa leñosa. El azufre forma una amplia variedad de compuestos en la biomasa tanto orgánicos como inorgánicos y pueden existir en distintos estados de oxidación. En el caso del sulfato es absorbido por las raíces de las plantas y las transporta a las hojas, en donde se produce el proceso de reducción. El azufre asociado orgánicamente se libera a bajas temperaturas, mientras que el S inorgánico se retiene en las cenizas de combustión hasta temperaturas de 900°C (Suriyati, et al., 2014).

La biomasa suele contener cloro, en este caso no se detecta pero si, metales alcalinos. Estos pueden causar depósitos y corrosión, durante la combustión, pero como se encuentran en bajos porcentajes no generaría inconvenientes.

El C es el elemento principal de los combustibles y cuando se quema, se pone en contacto con O_2 se libera como CO_2 como gas, por esta razón no se determina en ceniza. En cambio, luego de la pirólisis para producir Char, el C es predominante ya que la transformación se produce en una atmósfera inerte, con calor y en ausencia de oxígeno.

Determinación de volátiles por pirólisis

Durante la pirólisis de cada especie se succionaron gases instantáneos cada determinado tiempo para estudiar las características de evolución de los productos gaseosos. Las principales especies gaseosas que se analizaron fueron H_2 , CO , CO_2 , y CH_4 fueron preparados y muestreados en un Jeringa de 1 ml para cromatografía gaseosa. Los rendimientos de cada especie en diferentes pirólisis (Imagen 36, 37 y 38).

De los cromatogramas obtenidos en cada ensayo, se obtuvieron diferentes picos los cuales se integraron para obtener el valor correspondiente a sus áreas, esto permitió cuantificar la cantidad de H_2 , CO_2 , CH_4 y CO de cada muestra. Una vez obtenidas las áreas de cada especie se graficaron según cada compuesto por separado como muestran las imágenes.

En la Imagen 36 se puede observar que en la gráfica el CO_2 alcanzó su punto máximo en el sauce a los 200 °C y el coihue a los 300°C y luego disminuye con la temperatura. En el caso del ñire, se detecta más tarde a los 420°C y luego disminuye. En el caso de las otras especies solo dieron respuesta a temperaturas mayores.

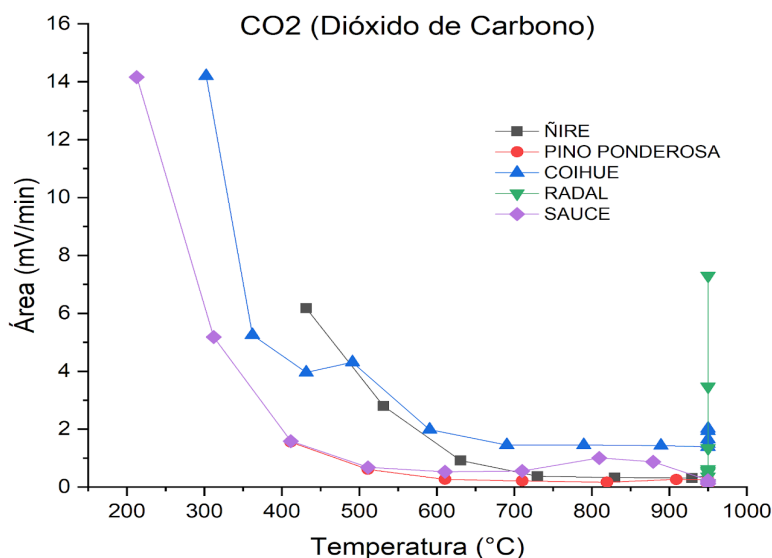


Imagen 36: Área de CO_2 de cada especie

Fuente: Imagen propia.

En la Imagen 37 se puede ver que el CO comenzó evolucionar a aproximadamente 250 °C en el sauce, a los 430°C en el ñire, alcanzando sus máximos 320°C y 650°C respectivamente, luego disminuye gradualmente. El pino ponderosa tiene su máximo en 400°C y después disminuye. Tanto el coihue como el radial tienen respuestas más tardías.

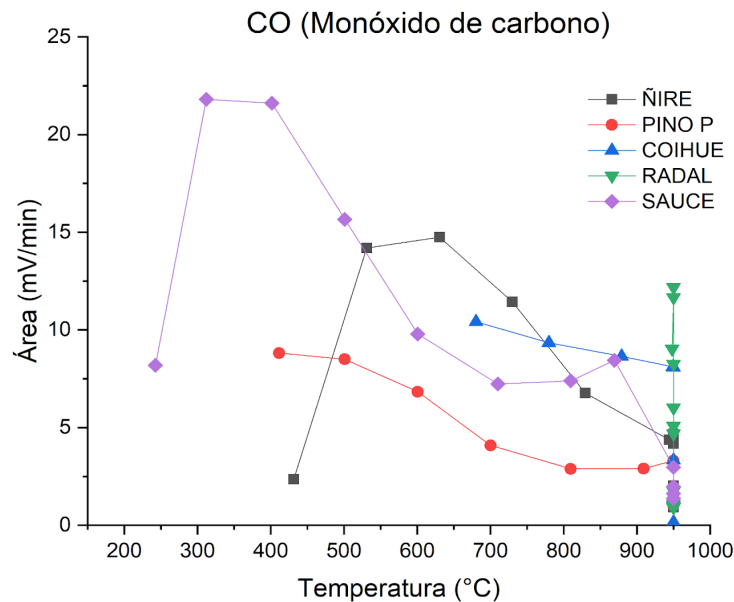


Imagen 37: Área de CO de cada especie

Fuente: Imagen propia.

La evolución de CH_4 comienza a los 300°C, en el caso del coihue alcanza su máximo a los 370°C aproximadamente, luego va disminuyendo, y en el caso del sauce luego de su máximo disminuye gradualmente. El pino ponderosa evoluciona levemente de 320 a 400°C, disminuyendo más tarde. Lo que sucede con ñire es similar a lo del sauce pero tiene su máximo a los 520°C (Imagen 38).

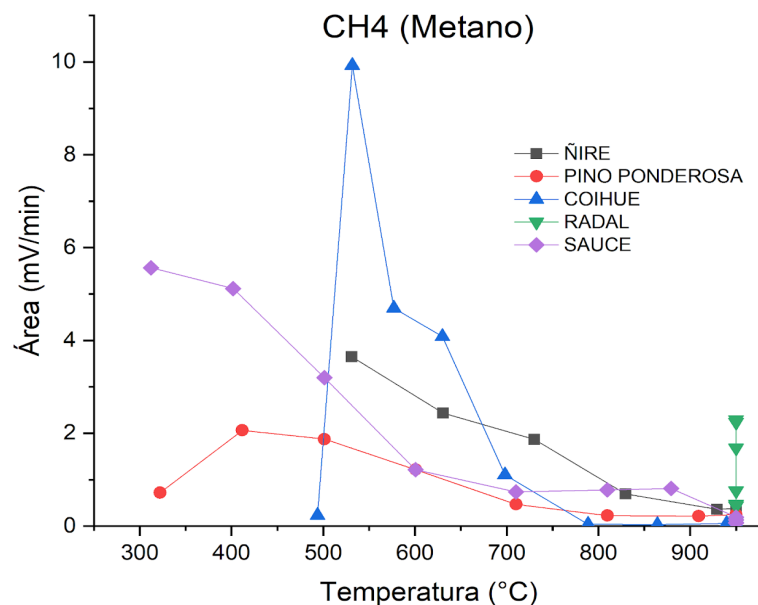


Imagen 38: Área de CH_4 de cada especie.

Fuente: Imagen propia.

En la imagen 39 se puede ver que el H_2 comienza a aparecer entre los 300 y 500°C, el coihue alcanza su máximo en 600°C y luego va disminuyendo, su área alcanzada es notablemente superior a las restantes. Las otras especies logran alcanzar su máximo a distintas temperaturas pero todas ellas un área similar.

En todos los casos los gases de las muestras de radial se manifestaron alrededor de los 950°C, esto pudo deberse a un error durante el procedimiento, toma de muestras a través de las inyecciones o por un error en la asignación de las inyecciones relacionadas a la temperatura.

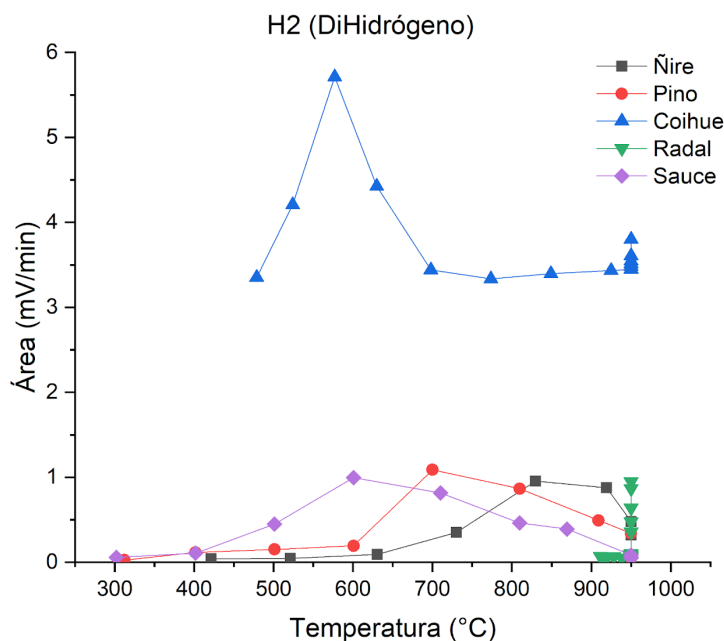


Imagen 39: Área de H2 de cada especie.

Fuente: Imagen propia.

10. Discusión

Ensayos de combustión:

A lo largo del trabajo se evaluó el comportamiento energético y la emisión de gases de combustión de la madera de cinco especies locales utilizadas para calefacción hogareña a través de diversos ensayos, así como también la caracterización de las mismas. De esta manera se pudo validar las hipótesis planteadas al principio del trabajo.

Con respecto a la primera hipótesis, el caso de la leña de ponderosa húmeda los valores de emisión dieron más altos y el periodo de combustión se extendió. Esto sucedió debido a que durante el proceso de combustión las partes exteriores de la leña recibe calor por radiación de las llamas calentando de esta forma el agua contenida en la leña por sobre su punto de evaporación. A partir de esto el proceso de secado inicia perdiendo humedad en la leña en forma de vapor de agua. En esta etapa de la combustión de leña se consume una fracción importante de la energía liberada.

Se puede observar que en los gráficos de emisión de CO se pudo observar que todas las especies obtuvieron resultados similares antes las mismas condiciones de secado, incluyendo las de ponderosa (humedad entre el 8 y 20%). Estos valores se situaron por debajo del Límite de la UE **2015/1185** dentro de los 20 y 30 min desde el inicio del fuego. Por lo tanto, en este sentido la leña de Pino se comporta de forma similar a las provenientes de las especies nativas ensayadas, pudiendo utilizarse como fuente energética poco contaminante, tal como lo habíamos planteado en la segunda hipótesis.

El pino es una madera blanda que al tener bastante resina desprende mucho calor, por lo tanto su uso sería óptimo como para iniciar una combustión y lograr altas temperaturas rápidamente.

Ensayos de caracterización:

La caracterización de biocombustibles se hace necesaria para lograr su mayor aprovechamiento energético y una mayor eficiencia en procesos de combustión.

El SEM-EDS de la ceniza de estas biomásas muestra la presencia principalmente de calcio, y en menor porcentaje magnesio, potasio, sodio y aluminio. Además se detecta fósforo, azufre, silicio y oxígeno. No se observan diferencias sustanciales en las composiciones de las diferentes cenizas. La ceniza de ñire contiene menor cantidad de minoritarios (solo Mg y Ca). Hasta 550°C la ceniza de biomasa está principalmente compuesta de carbonatos; sin embargo, cuando se alcanzan temperaturas más altas estos carbonatos tienden a descomponerse emitiendo dióxido de carbono y estos óxidos pueden reaccionar para formar silicatos.

En el char se identificaron los mismos elementos, sin embargo las concentraciones son mucho menores debido al alto contenido de carbono que en algunos casos no permite detectar los elementos minoritarios por esta técnica (cuando las concentraciones son menores al 0.5%). El carbono es el componente principal de la biomasa leñosa, el que mediante su oxidación libera energía, igual que el hidrógeno. En cambio, el oxígeno se encuentra oxidando de forma parcial a los otros dos elementos, contribuyendo a este proceso durante la transformación termoquímica.

La pérdida de masa en el calentamiento de ceniza de biomasa, en el rango de temperatura de 700°C y 900°C, es debida a la emisión de dióxido de carbono procedente de la descomposición de los carbonatos, principalmente calcita que es el principal carbonato presente.

Es importante destacar la trascendencia de disponer de los resultados que brinda este trabajo ya que se puede obtener un mejor conocimiento del proceso de descomposición térmica de cada una de las biomásas de estudio.

Comparación con otros estudios:

Para valorar energéticamente la biomasa forestal se considera adecuado analizar previamente el poder calorífico. Como se demostró en el informe, pueden haber leves diferencias en el poder calorífico de la madera, dependiendo de la especie. De esta forma, se ha procedido a realizar una búsqueda bibliográfica para poder establecer una comparación de valores obtenidos de esta experiencia y de otras especies utilizadas en la región para uso leñero.

El informe realizado por Gallo & Honorato (2022), muestra una caracterización de especies en la provincia del Chubut, las cuales se destacan por su gran disponibilidad en la

región, tales como con lenga (*Nothofagus pumilio*), laura (*Schinus patagonicus*), retamo (*Diostea juncea*) y chacay (*Discaria chacaye*). Por su parte, Carmona C. y Urzúa (2013) trabajó con el Ciprés de la Cordillera (*Austrocedrus Chilensis*); Cardozo (2019) evaluó al igual que Gallo & Honorato, lenga y retamo; Cardoso et. al. (2015) lo hizo con especies arbustivas. Por último, el centro de Investigación CIEFAP aportó algunos valores obtenidos de ensayos con eucalipto (*Eucalyptus globulus*), lenga y retamo. Los valores arrojados por cada uno de los trabajos están representados en la tabla 9.

Tabla 9: Datos de PCS (Kcal/m³) y densidad (Kcal/Kg) de especies regionales obtenidas de diversos informes.

	Gallo & Honorato		Carmona	Cardozo		Cardoso, et al. 2015		CIEFAP	
	PCS(Kcal /Kg)	Densidad Kg/m ³	PCS(Kcal/K g)	PCS(Kcal/K g)	Densidad Kg/m ³	PCS(Kcal/Kg)	Densidad Kg/m ³	PCS(Kcal/Kg)	Densidad Kg/m ³
Lenga	4612	-	4579	-	-	-	-	4425	-
Laura	4492	-	-	4317	530,1	-	-	-	-
Retamo	4586	-	-	4123	551,5	-	-	4608	-
Chacay	4663	-	-	-	-	-	-	-	-
Ciprés de la Cordillera	-	-	4792	-	-	-	-	-	-
Eucalipto	-	-	-	-	-	-	-	4650	737
Michay	-	-	-	-	-	2294	1031,09	-	-
Alpataco	-	-	-	-	-	2151	734,2	-	-
Molle Colorado	-	-	-	-	-	2182	926,5	-	-

Fuente: Elaboración propia.

A gran escala se puede decir que los valores obtenidos de las especies de El Manso se encuentran dentro del rango de las demás especies nativas, las cuales tienen cualidades de combustión relevantes.

La madera de ciprés de la cordillera presenta un mayor PCS que el resto de los valores. Sin embargo esta especie, actualmente no tiene un uso leñero debido a la importancia que tiene como conífera endémica y por su lento crecimiento, entre otras cosas.

Con respecto al informe de Cardoso, et. al., (2015), podemos observar que en el norte de la patagonia se emplean otras especies, más bien arbustivas, como combustible tales como: el michay (*Berberis microphylla*), el alpataco (*Prosopis denudans*) y el molle colorado (*Schinus johnstonii*), entre otras. Las propiedades físicas de la leña influyen en la preferencia de los lugareños y en la cultura de recolección. Claramente podemos ver que las especies de El Manso y las de Chubut doblan el valor de PCS de las especies arbustivas, cuyos valores rondan en 2151-2295 Kcal/Kg.

Es importante destacar que estos valores dependen del tipo de desarrollo, clima, crecimiento o edad de las distintas especies. Por lo tanto, los valores reportados en este trabajo para el resto de las maderas constituyen una referencia para nuevos estudios.

La densidad de la madera es otro de los parámetros de importancia, en este caso relacionado con la cantidad masa/energía contenida en el leño (Ordóñez-Díaz et al. 2015). La densidad de la madera es la propiedad que puede mantener las brasas calientes durante un período de tiempo significativo (Abbot, 1999)

A rasgos generales observando los valores y la información antes planteada se puede ver que las especies del noroeste de la patagonia poseen valores de densidad más altos que los de el Manso y de las otras especies locales. Pudiendo así, mantener las brasas calientes por más tiempo.

Para finalizar, con respecto a las emisiones de CO durante la combustión de leña no es posible realizar una comparación ya que no hay trabajos realizados con especies locales. En este sentido, se puede decir que este trabajo es pionero y que contribuye al entendimiento de este tema.

11. Conclusiones

A nivel mundial los combustibles maderables son de importancia para el ser humano, en especial como fuente de energía para suplir las diversas necesidades como lo es la combustión. Por esta razón, debido a que es una práctica cotidiana y desarrollada durante siglos es importante realizar estudios para evaluar y promover prácticas sustentables, en pos del cuidado del ambiente.

Algunas de las sustancias nocivas más destacables que se producen durante la combustión son: dióxido de carbono, monóxido de carbono, compuestos de azufre y óxidos de nitrógeno.

En la generación de biomasa en la naturaleza, el dióxido de carbono es tomado de la atmósfera, donde es devuelto tras la combustión de la biomasa. De esta manera, teóricamente, la combustión de la biomasa no supone un aumento en el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera, por lo que no contribuye al efecto invernadero. El problema es que el ritmo de combustión de la biomasa es muy superior al de producción. Las emisiones de monóxido de carbono durante la combustión de la biomasa son considerables y dependen del procedimiento y de la tecnología empleada. Para reducir dichas emisiones es necesario que el equipo de combustión funcione adecuadamente y se produzca una combustión completa.

Para la Salud pública el monóxido de carbono es un verdadero problema. De hecho, en nuestro país, es el causante de miles de intoxicaciones al año, la mayoría de las cuales se producen durante el período invernal. El monóxido de carbono no implica un peligro de incendio como otros gases, pero sí muchos riesgos para la salud, como lo es el envenenamiento. Tras la inhalación, las moléculas de CO reemplazan rápidamente a las moléculas de oxígeno en la sangre. Aunque es indetectable para los sentidos humanos, este

gas es sumamente peligroso ya que hace que el monóxido de carbono ocupe el lugar del oxígeno en la hemoglobina (el pigmento rojo en la sangre que distribuye el oxígeno por todo el cuerpo)(Ministerio de la Salud Argentina, 2022). Esta inhalación provoca efectos nocivos, que se irán agravando a medida que se alargue la exposición a este gas.

Los compuestos de azufre más frecuentes en la combustión son los óxidos de azufre, que se convierten en ácido sulfúrico, que dan lugar a la lluvia ácida. En general, el uso de la biomasa no constituye un problema importante en cuanto a las emisiones de azufre, ya que las cantidades de azufre en origen son pequeñas.

Los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación del nitrógeno presente en el aire y de los compuestos nitrogenados que contiene la biomasa. Sin embargo, dado que la combustión de la biomasa se realiza a temperaturas inferiores en general a las de los combustibles fósiles, la formación de estos compuestos es menor. Para reducir estas emisiones de óxidos de nitrógeno es necesario controlar rigurosamente el proceso de combustión, tanto en el aspecto térmico como en el aporte de aire.

Recomendaciones durante la combustión a leña

- La humedad es un factor muy importante en el incremento de las emisiones.
- Para encender el fuego se recomienda usar troncos de leña seca (humedad entre 8 y 20%) preferentemente pino.
- Cuanto más humedad tiene la madera mayor cantidad de agua hay que evaporar, y en esta evaporación se consume calor con lo que la reacción de combustión invierte parte del calor producido en evaporar agua
- Debe haber espacio suficiente para la circulación del aire dentro de la cámara de combustión, y a su vez una separación entre leños. La estufa no se debe sobrecargar, debiendo ser los leños proporcionales al tamaño de la instalación. Si los leños no están cortados y están en una pila compacta quedará poco espacio para que el aire penetre en la carga, causando una combustión incompleta.
- En el inicio del fuego o después de realizar una recarga de leña, la necesidad de aire es alta. Por lo tanto, durante al menos 15 minutos o hasta que el fuego esté asentado, el operador debe asegurar que el suministro de aire es suficiente abriendo totalmente los reguladores. El operador debe procurar que haya una cantidad de aire suficiente para que la combustión sea completa. Evitar quemar en condiciones de fuego lento, debido a que no consigue quemar los gases volátiles. También debe controlar la entrada de aire en exceso para evitar que la velocidad de quema sea excesiva, ya que contribuye a un déficit de oxígeno y al rápido consumo de la carga.

Recomendaciones en la compra de una estufa:

Al momento de adquirir una estufa es importante optar por una de doble combustión o combustión lenta. Este tipo de estufas utiliza los gases resultantes de la primera combustión del fuego de origen (primera combustión). Toma esos gases, y antes de que salgan por el tiraje

los hace recircular y los vuelve a quemar dentro de la caja de fuego (segunda cámara de combustión).

Como resultado de ese doble proceso de quemado la estufa genera mucho más poder calórico, en un tiempo más corto, libera menos gases contaminantes y utiliza menos madera para lograrlo.

12. Presupuesto del proyecto

A continuación se muestra el presupuesto tentativo final de los costos proyecto, tanto en los ensayos de combustión como los de caracterización(Tabla 10).

Tabla 10. Presupuesto tentativo final

Recursos físicos		Cantidad	Observación	Precio (\$)	Precio Total (2022) Precios Argentinos	Valor en dólares	Valor estimado 2023 - Pesos Argentinos
Ensayos de combustión	Precio del flete	1	Desde el paraje El Manso hasta delegación CIEFAP Bariloche	10000	10000	35.2	17077.5
	Compra de estufa bosca	1		65790	65790	231.7	112352.6
	Caños	10		4700	47000	165.5	80264.1
	codos	4		3300	13200	46.5	22542.3
	Sellador Silicona	1		2854	2854	10.0	4873.9
	Reducción galvanizada	1		1300	1300	4.6	2220.1
	Estractor	1		19000	19000	66.9	32447.2
	Otros	1		5000	5000	17.6	8538.7
Ensayos de caracterización	Análisis de DRX	5		10000	50000	176.1	85387.3
	Molienda	10		2000	20000	70.4	34154.9
	Analisis FTIR	15		10000	150000	528.2	256162.0
	ATD-TG	1		25000	25000	88.0	42693.7
	Pirólisis con GC	5		20000	100000	352.1	170774.6
	SEM	8	precio por hora	50000	400000	1408.5	683098.6
	PCS	1		25000	25000	88.0	42693.7
	Tratamientos térmicos con hornos/mufla	5		5000	25000	88.0	42693.7
TOTAL \$					959144.00	3377.27	1637974.79

Datos extraídos de Ámbito Financiero: Cotización del Dólar Blue - \$284 (30/9/2022), \$485(03/06/2023).

13. Análisis económico

En términos de su valor económico total, el bosque nativo andino-patagónico ofrece una gran diversidad componentes que permiten proveer bienes y servicios con valor de uso directo tales como el uso de leña(Chauchard, et al. 2008).

En general, la decisión de utilizar distintos tipos de energía depende de varios factores, entre ellos los precios, ingreso de las personas, de la disponibilidad, de la fiabilidad del suministro y del contenido energético de tales alternativas. Otro factor son los costos del cambio de equipo (por ejemplo, cocinas económicas). Sin embargo, en muchas zonas rurales, sencillamente no hay ninguna alternativa al empleo de leña debido a la lejanía o a la falta de infraestructura para la distribución de otras fuentes de energía.

Otros factores sociales y ambientales que influyen en el consumo de leña en los hogares son el clima (por ejemplo, la altitud, la duración del invierno y las estaciones de

lluvias), el acceso a los mercados y recursos forestales, los efectos para la salud y el medio ambiente del empleo de leña (por ejemplo, el humo) y variables culturales. Estos otros factores pueden ser importantes y deben tenerse en cuenta en los programas y políticas de fomento de la dendroenergía (Situación de los bosques del mundo, 2005).

Dentro de la economía campesina la leña juega un rol fundamental, la venta de leña representa un importante aporte a los ingresos prediales. Existen casos en donde se acude al ingreso que genera el bosque en situaciones de necesidad y otros donde la explotación del bosque constituye la principal fuente de ingresos. Un problema fundamental son los precios de este combustible, muchas veces son los comerciantes de leña los que fijan los precios en zonas rurales en las que el productor se ve obligado a vender su leña a un precio preestablecido, el que muchas veces no refleja en absoluto los precios de producción (Vera, 2016).

El formato de leña más consumido es el metro cúbico, a continuación se detallan algunos de los precios de leña de la zona.

- **\$3500** el m3 - Pino - (Comisión de promoción del sector foresto industrial- Plan calor 2023 - Bariloche)
- **\$8300** el m3 - Pino - (Empresa maderera Arcano Dina Huapi- 2023)(Referencia)(Fuente: <https://www.arcano.com.ar/>)
- **\$4000** el m3 - Especies varias entre ellas Pino (Venta informal en el paraje El Manso)

14. Referencias

- Alvarez, R. Victor. 2013. Estudio experimental de la gasificación de char de pirólisis de lodos de EDAR. Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y arquitectura.
- Ana Isabel de Lucas Herguedas, C. del P. T. 2012. Biomasa, Biodiesel, y Sostenibilidad Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT. 100 Avenida de Madrid, 44. C.U. "La Yutera" Edif. A. 34004 Palencia.
- Aranguéz, E. & et al. 1999. Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. Rev. Esp. Salud Pública vol.73 no.2 Madrid.
- Agencia de Sostenibilidad Energética. 2022. Proyecto compara la electricidad y la leña para calefaccionar una casa. Gobierno de Chile.
- Biswas, B., et al., 2020. Pyrolysis of forest biomass residues: comparative study of shimbhal, cokad, cheed and cerus. J. Energy Environ. Sustain. 10, 38–46
- Biswas, B. et al., 2022. Biomass characterization. Chapter 7. Material Resource Efficiency Division (MRED), CSIR-Indian Institute of Petroleum (IIP), Dehradun, India b Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR), Ghaziabad, Uttar Pradesh, India c Microbial Processes and Technology, CSIR-National Institute for Interdisciplinary Science and Technology, Trivandrum, India.
- Boso, A. et al., 2018. Narrativas de resistencia al cambio energético sustentable, el caso de la calefacción y las cocinas a leña de las ciudades de Temuco y Padre las casas, Chile. ResearchGate. Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT) del Gobierno de Chile
- Boso Álex G. & Álvarez E. Boris. 2018. Representaciones sociales de la contaminación del aire y las estufas a leña en diferentes niveles socioeconómicos de la ciudad de Temuco, Chile. Rev. Int. Contam. Ambie. 34 (3) 527-540.
- Calor y Frío. 2019. Ecodesign 2022: Los fabricantes de estufas y calderas de biomasa están preparados para los cambios. Recuperado de: <https://www.caloryfrio.com/energiasrenovables/biomasa/ecodesign-2022-los-fabricantes-de-estufas-y-calderas-de-biomasa-estanpreparados-para-los-cambios.html>. (última revisión 20/02/2023)
- Cardoso YA. 2019. Manejo del matorral norpatagónico y dendroenergía: potencialidad regional del residuo forestal. Trabajo final Grado. U.N. Río Negro.
- Cardoso, Betina et al, 2015. Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. Biomass and Bioenergy 81: 514-20.
- Carmona Cerda, R. J., 2015. Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible. Universidad de Córdoba. Córdoba, España.
- Cereceda-Baliceta et al., 2012. "Obtaining PAHs concentration ratios and molecular markers for residential Wood combustion: Temuco, a case study". Journal of the Air & Waste Management Association 62: 44-51.
- Centro de Análisis de Políticas Públicas, 2013. Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2012. Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile.

- Chauchard, L. et al. 2008. Manual para las buenas prácticas forestales en bosques nativos de Norpatagonia. Una guía para las buenas prácticas. Argentina.
- Elsom Derek. 1990. La contaminación atmosférica. Madrid: Cátedra
- Fernández-Puratich, H., 2012. Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- FOCER, 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Biomass Users Network (BUN-CA). San José, Costa Rica.
- Gallo Lucas & Honorato, Martín, 2022. Poder calorífico de la madera de seis especies forestales nativas de Chubut. Revista Patagonia Forestal. CIEFAP - INTA.
- Gallopin, G. et al., 2005. Impacto de la ganadería en la cuenca del Río Manso Superior. Parte 1: Bosque de Ñire con Laura. Anales de Parques Nacionales. Tomo XVII. Editorial APN.
- Garrido, F. Lara. 2015. Contribuciones en la investigación de las cenizas y del ensuciamiento en calderas de combustión de biomasa: técnicas analíticas y contraste experimental. Tesis Doctoral. Universidad de Vigo. España.
- Giraldo, A. et al. 1999. Caracterización de biocombustibles lignocelulósicos mediante análisis térmico, caracterización de la paja de cereal. Departamento de Ing. Química. Era solar.
- Gonda, H. et al. 2009. "Inventario del Bosque Implantado en la Provincia de Neuquén". Ecogestión 2009. Primera reunión sobre planificación y legislación forestal.
- Graedel Thomas, & Crutzen Paul, J. 1989. Una atmósfera cambiante. *Metereología. Investigación y Ciencia* 1989;158:22-32
- Guimar, J. et al., 2009. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Ind. Crop Prod.* 30, 407–415.
- Harmelink, M., Voogt, M., Joosen, S., Jager, D., Palmers, G., Shaw, S. y Cremer, C. 2004. Implementation of renewable energy in the European Union until 2010. Utrecht, Países Bajos, Ecofys.
- Hine D. W., Marks A. D., Nachreiner M., Gifford R. y Heath Y. (2007). Keeping the home fires burning: the affect heuristic and wood smoke pollution. *J. Environ. Psychol.* 27 (1), 26-32. DOI: 10.1016/j.jenvp.2007.01.001.
- Hilbert, J. et al. 2010. Evaluación del potencial de producción de biocombustibles en Argentina, con criterios de sustentabilidad social, ecológica y económica, y gestión ordenada del territorio. El caso de la caña de azúcar y el bioetanol. INTA.
- Instituto de Salud Pública, 2012. Método CH-5G. Determinación de la mediciones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución. Libro de metodologías aprobadas. Ministerio de Salud, Gobierno de Chile.
- Instituto de Salud Pública, 2013. Método CH-5G. Determinación de material particulado y certificación y auditoría de calefacción a leña. Libro de metodologías aprobadas. Ministerio de Salud, Gobierno de Chile.

- IEA(International Energy Agency). (2020a.) World Energy Outlook.
- IEA (International Energy Agency). (2020b). World Energy Outlook Special Report: Prospects for Biogas and Biomethane.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Special Report on Global Warming of 1.5 °C. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Comunicado de Prensa. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/press/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_es.pdf
- Keil, M. et al. 2013. Propiedades físicas de la madera de Pinus ponderosa Dougl. ex Laws, proveniente de la provincia de Neuquén, Argentina. II Jornadas Forestales Patagonia Sur. Calafate, Argentina.
- Ley N° 26.331. 2007. de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos. Infoleg.
- Ley 22.351. Resolución N° 000011. 1994. Reglamento forestal para los monumentos naturales, parques, reservas nacionales de la región andinopatagónica. Infoleg
- Madariaga, M. Cecilia. 2019. El valle del Río Manso Inferior y su funcionamiento como sistema. Área de Desarrollo Rural. Comunicación técnica N°250. INTA Bariloche.
- Manual de usuario calefactores a leña Bosca. 2020. Bosca Chile S.A.
- Marcos F. y S. Villegas, (2000). Nueva fórmula para la determinación del poder calorífico en función de la humedad. Universidad Politécnica de Madrid.
- Marrugo, G., Valdes, C.F. & Chejne, F., 2016. Characterization of Colombian agroindustrial biomass residues as energy resources. Energy Fuel 30, 8386–8398.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2014. Estrategia de Descontaminación Atmosférica en Chile: 2014-2018. Ficha situación de Planes, Región de La Araucanía
- Ministerio de Energía. 2021. ¡Seamos secos y eficientes en el uso de la leña!. Unidad 12.
- Nuñez, N. Alejandra. 2014. Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la Región de los Lagos. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Chile.
- Ordóñez-Díaz, J. et al,, (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. Madera y Bosques 21(Núm. esp.): 77–126.
- Orrego, R. Estefania. 2001. Cambios estructurales fisicoquímicos de la biomasa durante la pirólisis lenta. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, Colombia.
- Paiva, J. et al., 2004. Carbon fiber reinforced carbon composites from renewable sources. Polym. Technol. Eng. 43, 1187–1211.
- Patiño, J. y Smith, R. 2008. “Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico”. Revista Energética No 39. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, pg. 19-34.

- Peña, V. Santiago. 2016. La biomasa, importancia, características y formas de preparación.
- Přemyslovská, E., Šlezingerová, J., Rybníček, M., Gryc, V., Vavrčík, H. y L. Praus, (2007). Basic density of wood in different forest type. Proceedings of International Scientific Conference Bioclimatology and Natural Hazards. N. o Horáček 1998: 1-4.
- Abbot, J.D. Lowore. 1999. Characteristics and management potential of some indigenous firewood species in Malawi, For. Ecol. Manage. 119.
- Reglamento (UE) 2015/1185. 2015. Diario Oficial de la Unión Europea
- Rivero J. Carlos. 2021. Pino: qué es, para qué sirve, tipos y características. Agrotendencia.
- Rocca, D. Patricia. 1998. Estudio de procesos de conversión térmica de biomasa. Tesis de posgrado. Facultad de ciencias exactas y naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Sathaye, J. y Tyler, S. 1991. Transition in household energy use in urban China, India, the Philippines, Thailand, and Hong Kong. Annual Review of Energy and Environment, 16: 295-335.
- Schueftan & González. 2015. "Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile". Energy Policy 79: 48-57
- Secretaría de Energía. 2008. Energías Renovables. Energía Biomasa.
- Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E. & Conrad, C.M., 1959. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. Text. Res. J. 29, 786–794.
- Simón, D. et al. 2020. Ceramic bricks containing Ni ions from contaminated biomass used as adsorbent. Sustainable Environment Research 30:26
- Situación de los bosques del mundo. 2005. Aspectos económicos de la dendroenergía. Parte II.
- Skoog, D. A., Holler, F. J. & Timothy, A. N., 2001. Principios de análisis instrumental. s.l.:McGraw-Hill
- Suriyati, et al., 2014. Release of Chlorine and surface during biomass torrefaction and Pyrolysis. Energy fuels 28.
- Šupić, S.; et al. 2021. Reactivity and Pozzolan Properties of Biomass Ashes Generated by Wheat and Soybean Straw Combustion. Materials 2021, 14, 1004
- Vera, F, Nicole. 2016. Evaluación de las tasas de producción de biogás al añadir bacterias facultativas a purines bovinos con el fin de determinar si es posible su uso como combustible en reemplazo de la leña como método de calefacción. Facultad de Ingeniería Departamento de Medio Ambiente. Universidad de Playa Ancha. Chile.
- WBA (World Bioenergy Association). 2019. Global bioenergy statistics 2019.
- World Bank. 2013. Atlas of Global Development: A Visual Guide to the World's Greatest Challenges. Washington DC: Collins
- Xu, F., Shi, Y.C. & Wang, D., 2013. X-ray scattering studies of lignocellulosic biomass: a review. Carbohydr. Polym. 94, 904–917.

Yang, H. et al, 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86, 1781–1788.

Zanardi, Pablo, 2012. ¿Puedo quemar pino en la chimenea?. Consejos y recomendaciones. Todo chimeneas.

15. Anexo I

Emisiones de CO Pino Ponderosa Humedad 8-16%

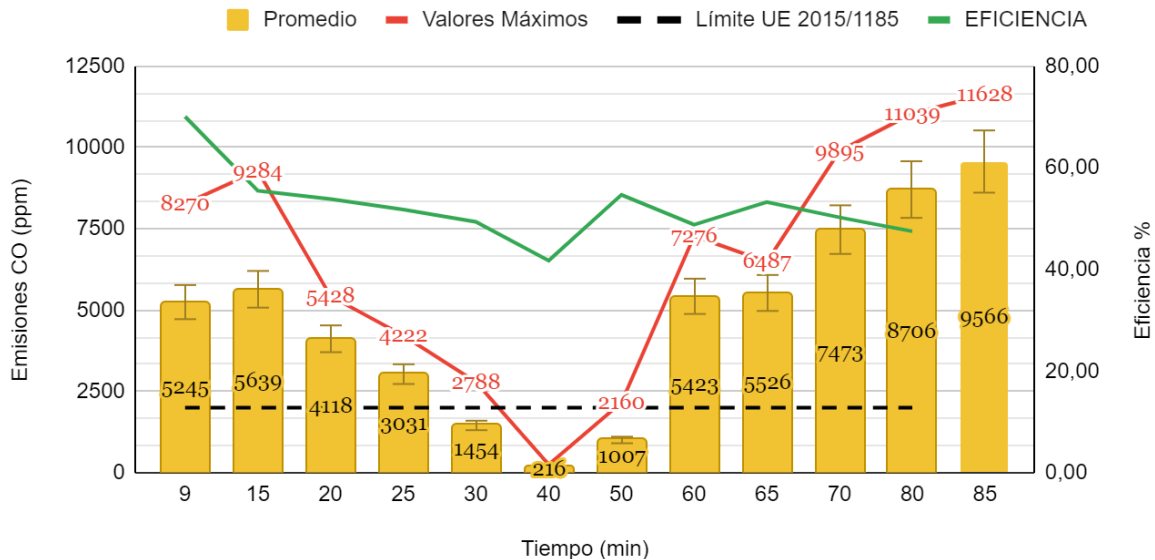


Imagen 40: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 8 y 16% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

Fuente: Elaboración propia

Emisiones de CO Ñire Humedad 9-12%

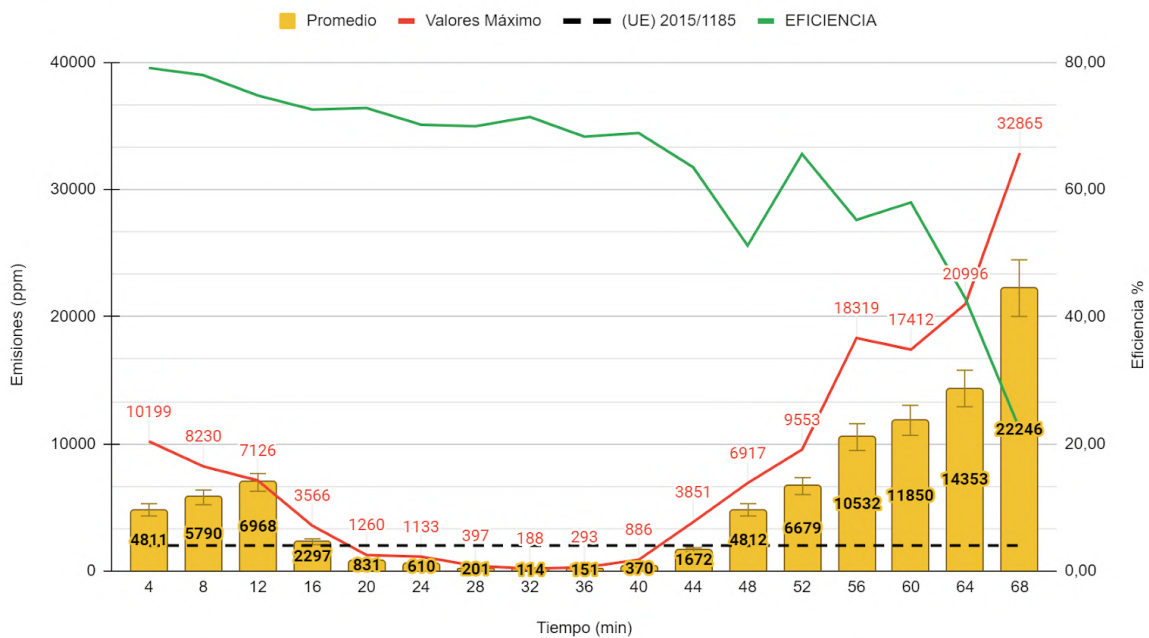


Imagen 41: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Ñire entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

Fuente: Elaboración propia

Emisión de CO Coihue Humedad 9-12%

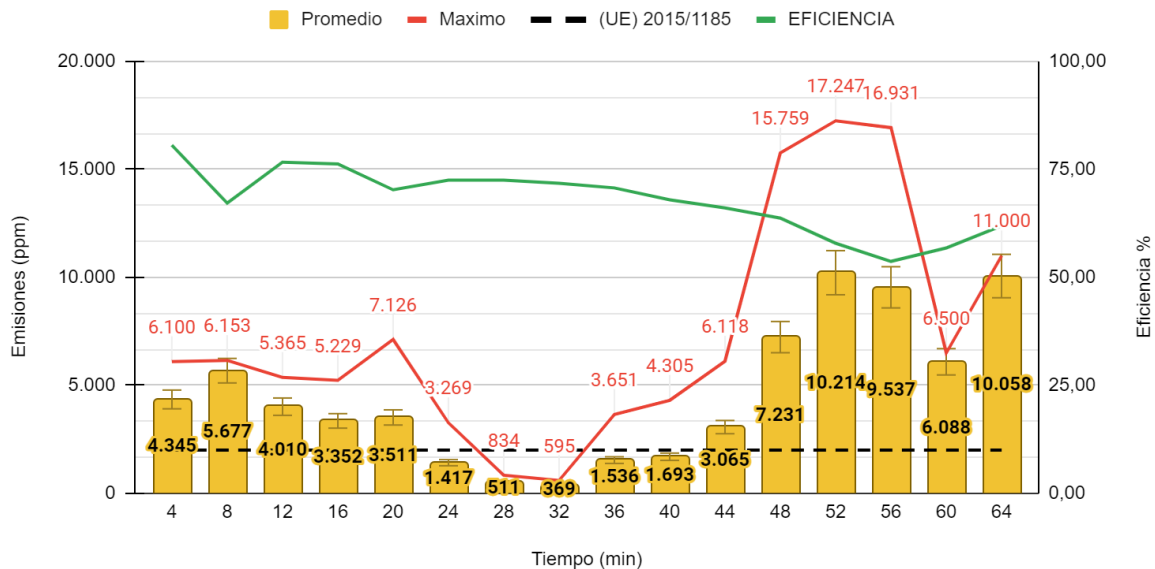


Imagen 42: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Coihue entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

Fuente: Elaboración propia

Emisiones CO Sauce Humedad 9-12%

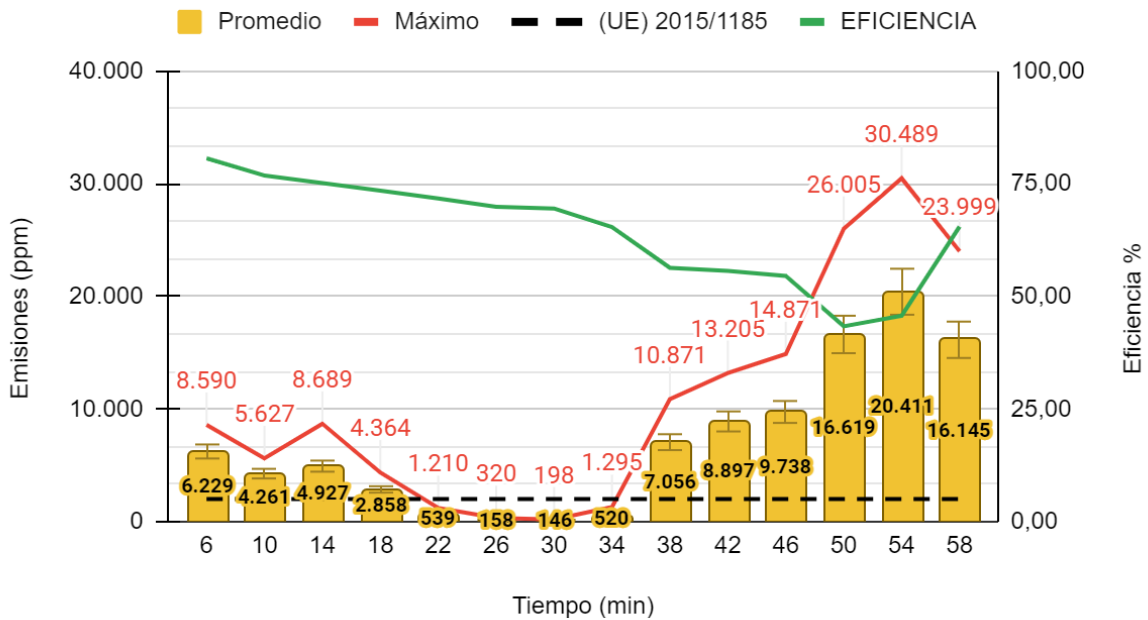


Imagen 43: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Sauce entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

Fuente: Elaboración propia

Emisiones CO Radal Humedad 9-12%

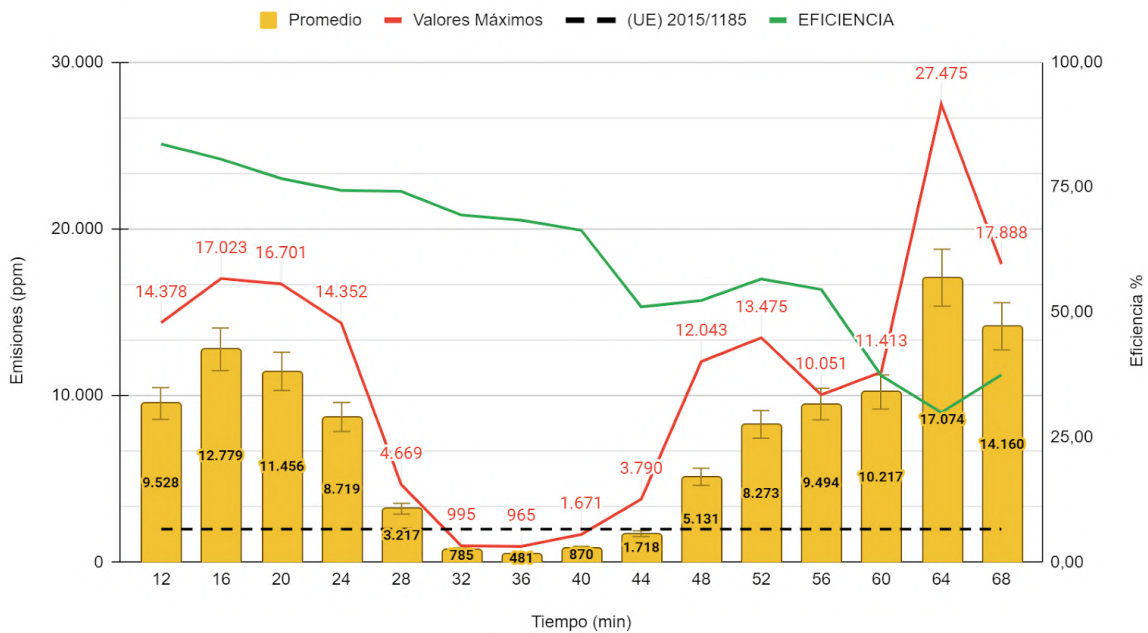


Imagen 44: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de Sauce entre 9 y 12% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

Fuente: Elaboración propia

Emisión CO Pino Ponderosa Humedad 30-40%

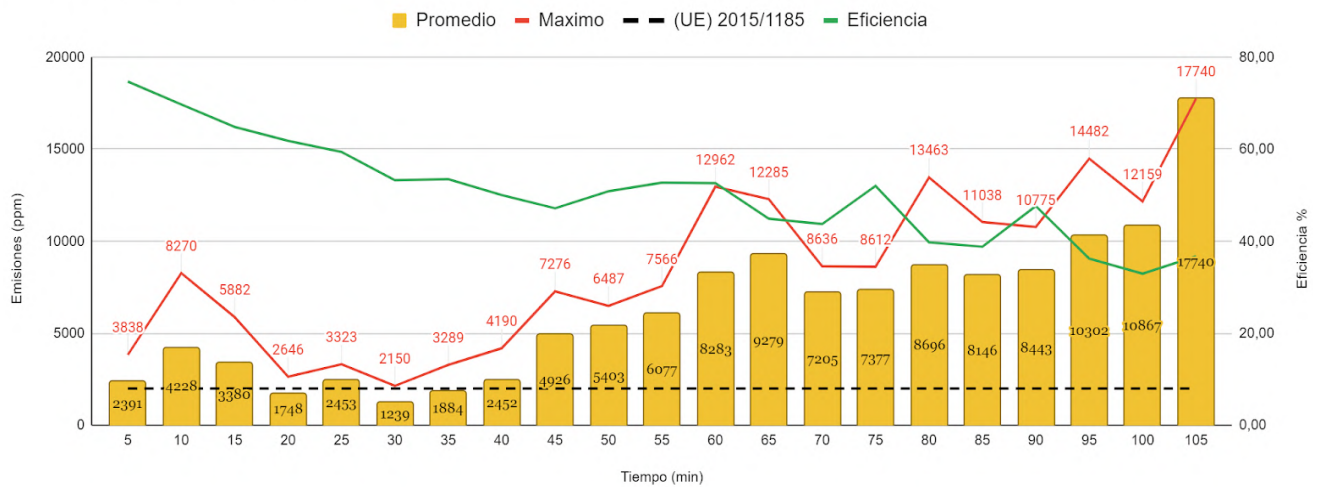
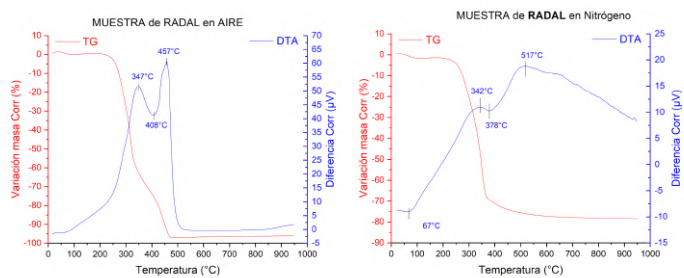


Imagen 45: Valores de CO corregido al 13 % en estufa Bosca con tres muestras de pino ponderosa entre 30 y 40% de humedad mostrando los promedios y los máximos de cada medición.

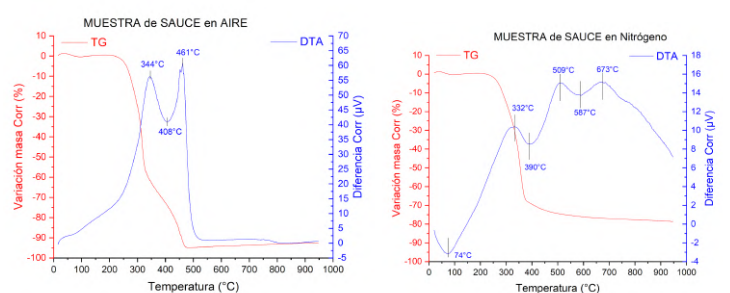
Fuente: Elaboración propia

16. Anexo II

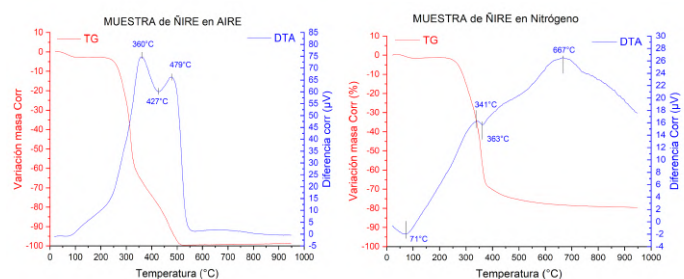
Gráficos de TG/DTA de todas las muestras de biomasa en aire y en Nitrógeno



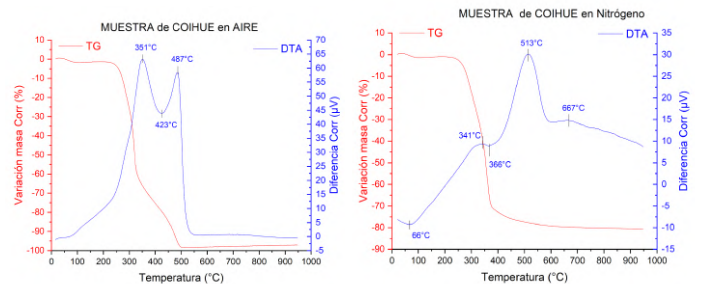
Muestra de Radal en N₂ y Aire respectivamente.



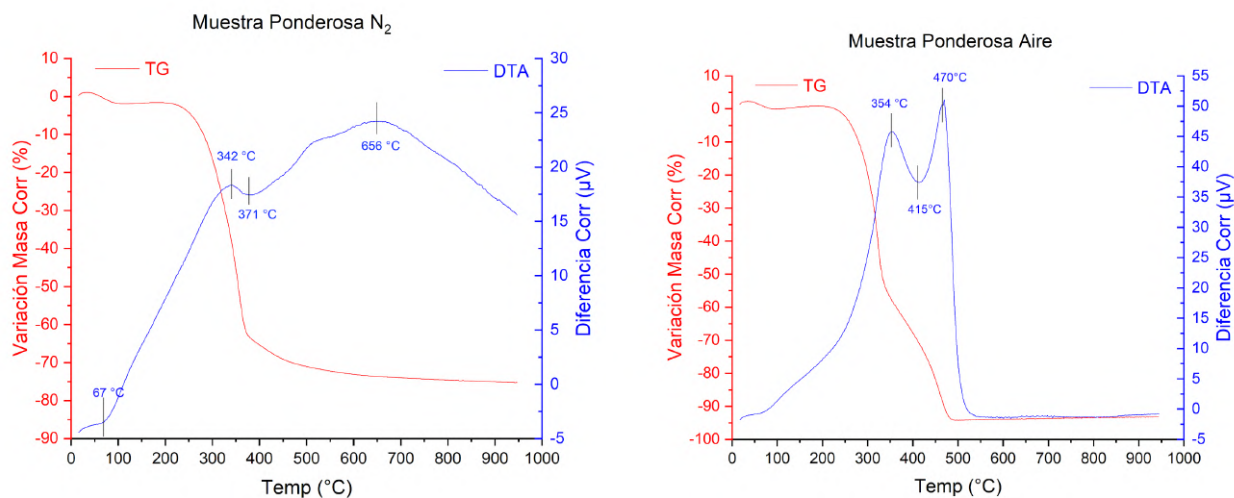
Muestra de Sauce en N₂ y Aire respectivamente.



e. y f.) Muestra de Ñire en N₂ y Aire respectivamente.



g. y h.) Muestra de Coihue en N₂ y Aire respectivamente.



i. y j.) Muestra de pino ponderosa en N₂ y Aire respectivamente.

Imagen 46: Gráficas DTA/TG de todas las biomásas de estudio.

17. Anexo III

A continuación se presentan los difractogramas de cada una de las muestras de cenizas.

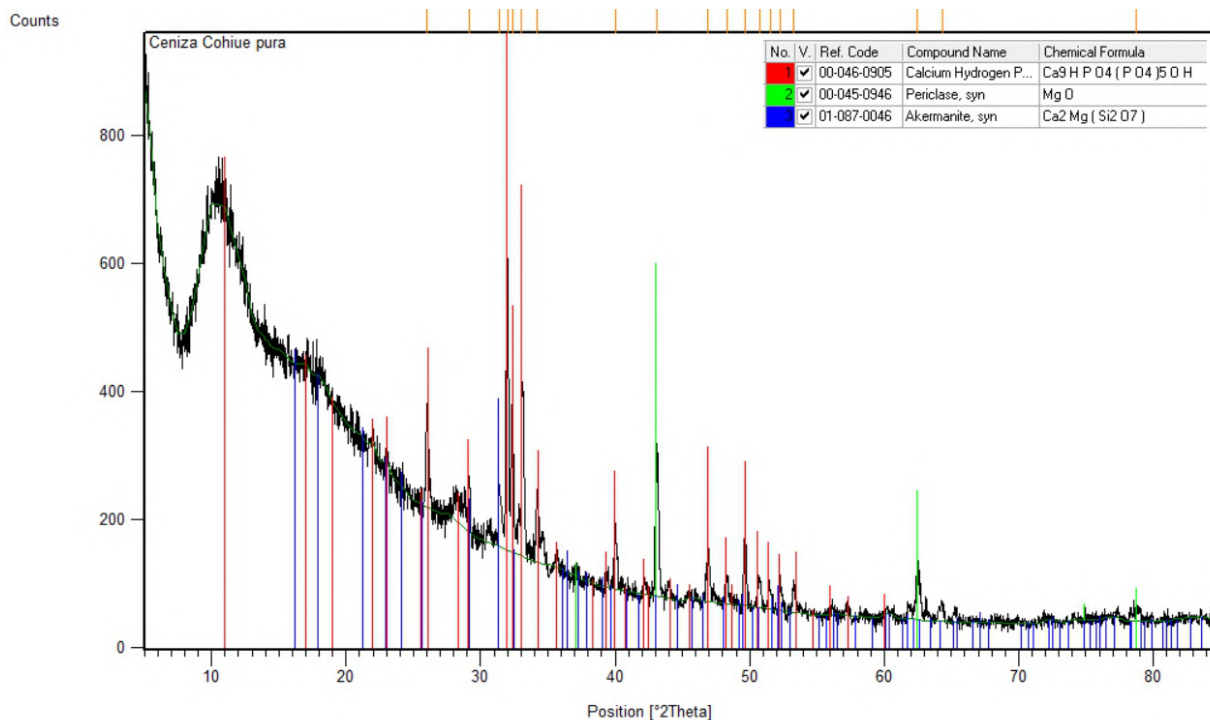
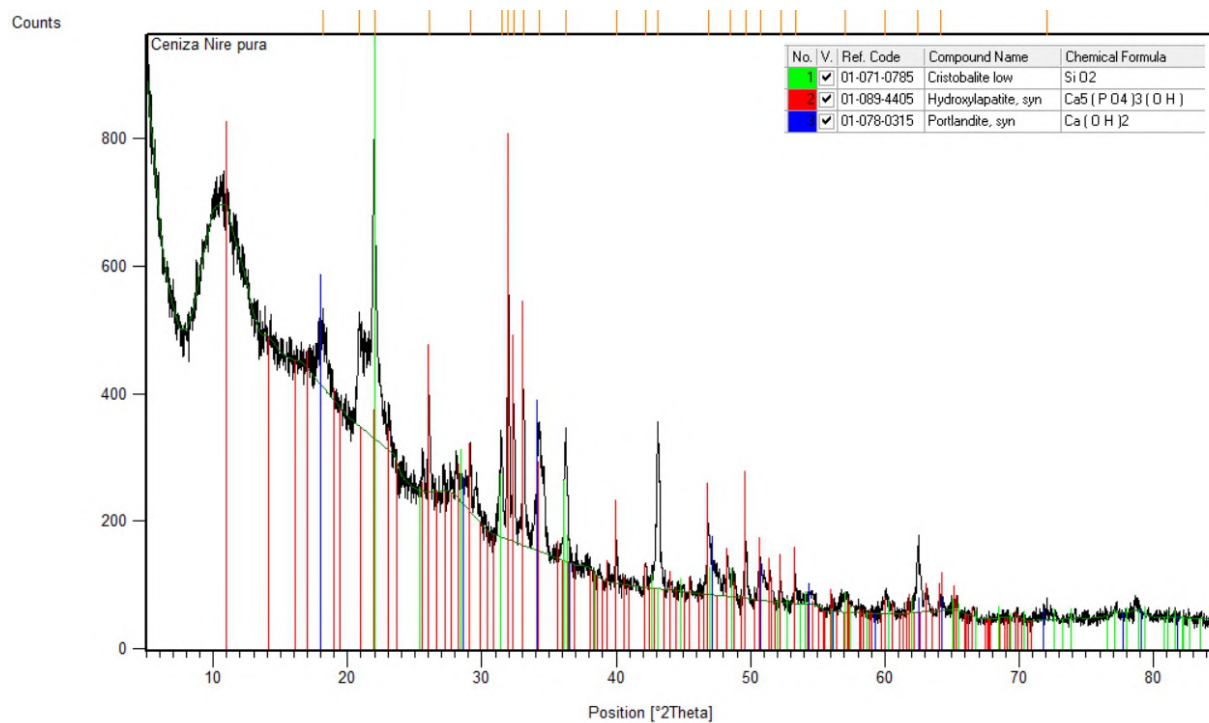
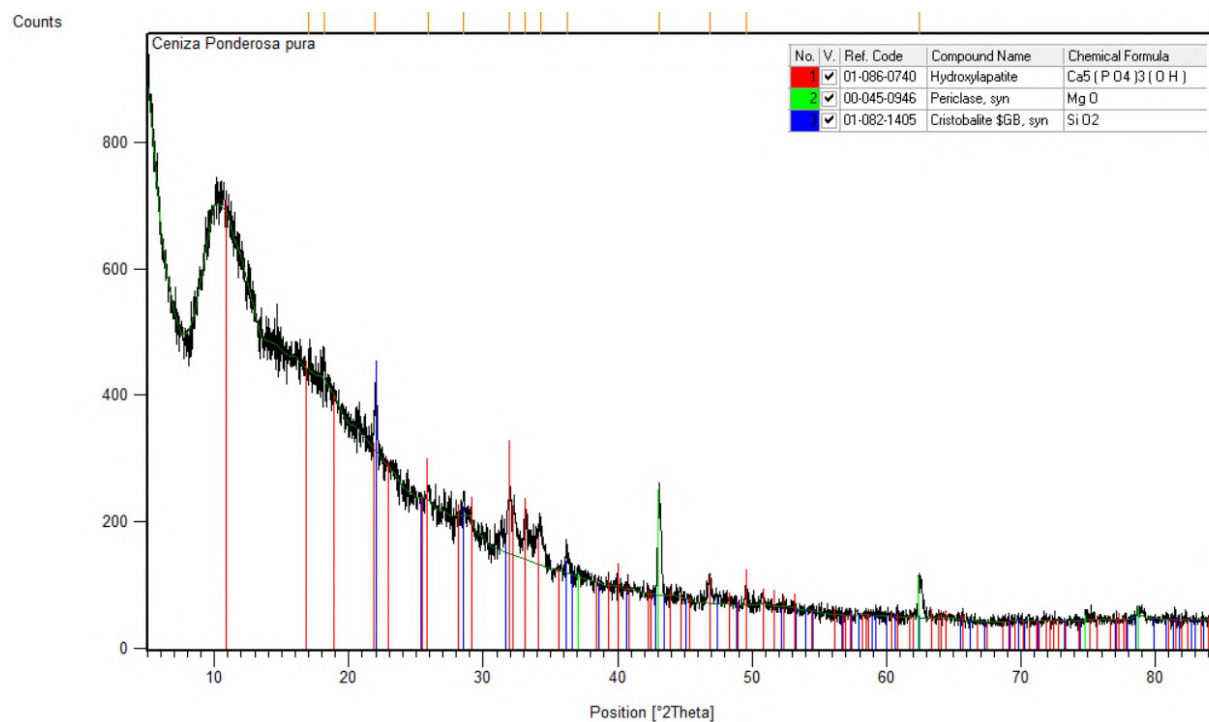


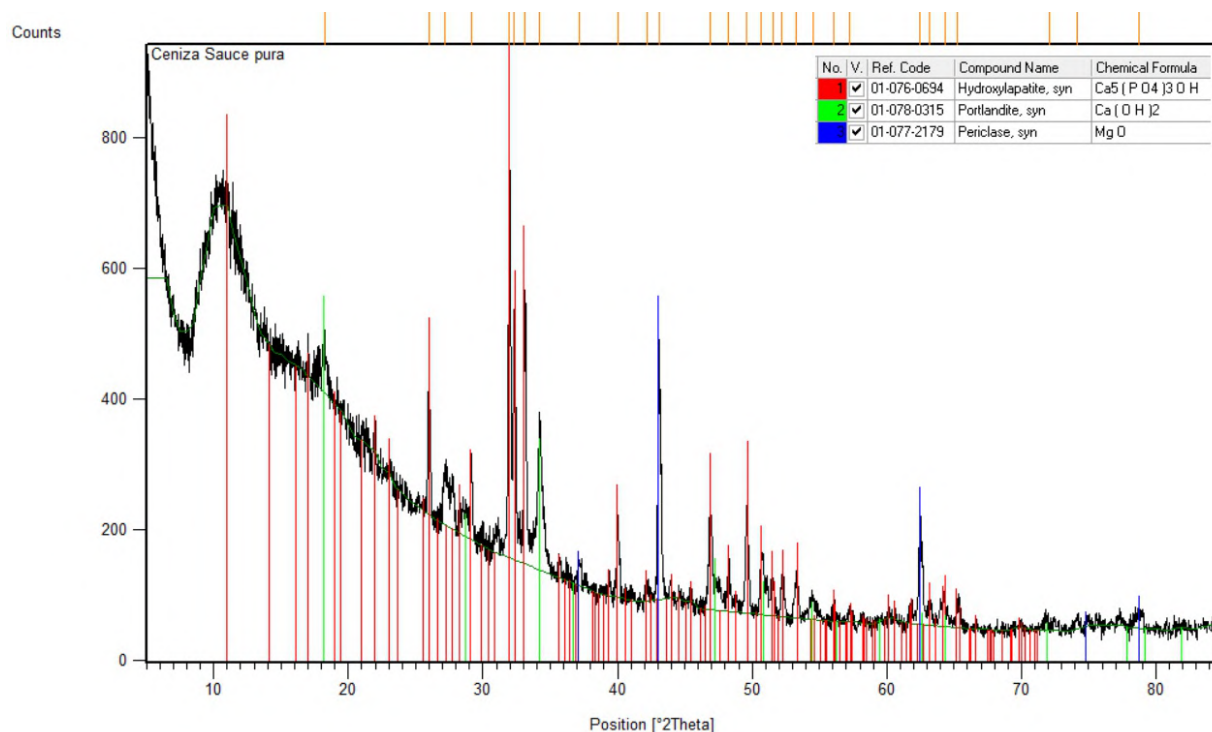
Imagen 47: Difractograma de Rayos X de ceniza de Cohiue.



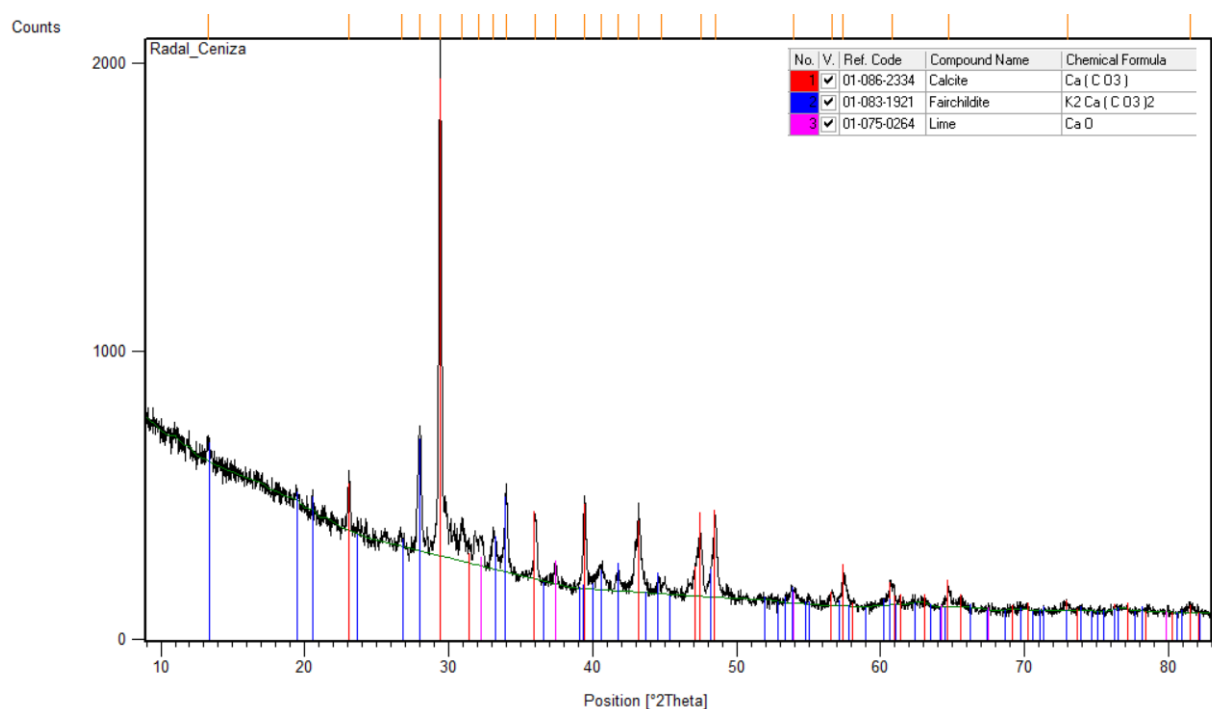
Imágen 48: Difractograma de Rayos X de ceniza de Ñire.



Imágen 49: Difractograma de Rayos X de ceniza de ponderosa.



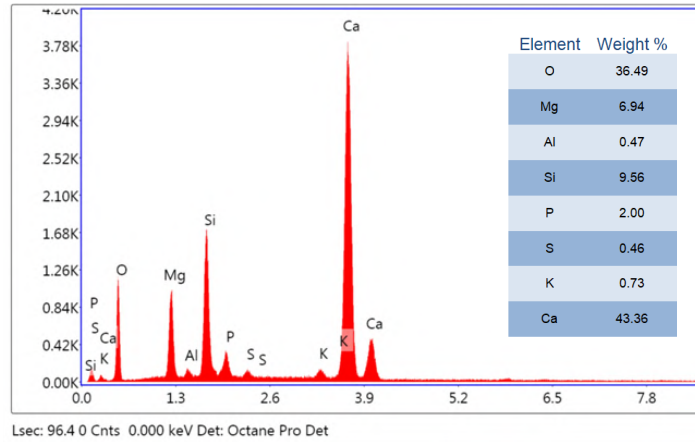
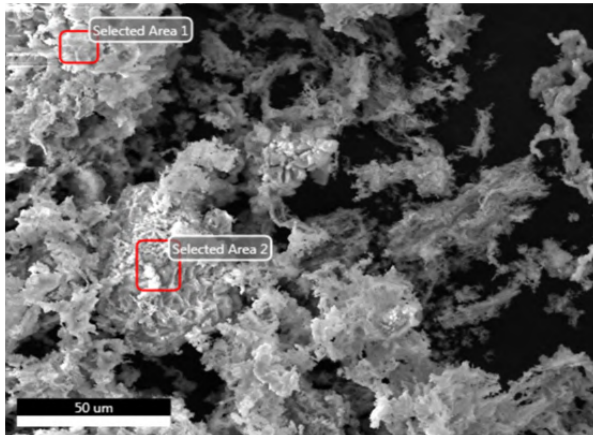
Imágen 50: Difractograma de Rayos X de ceniza de Sauce.



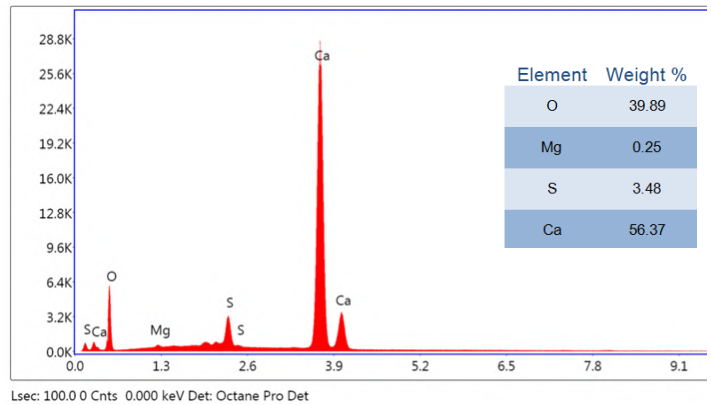
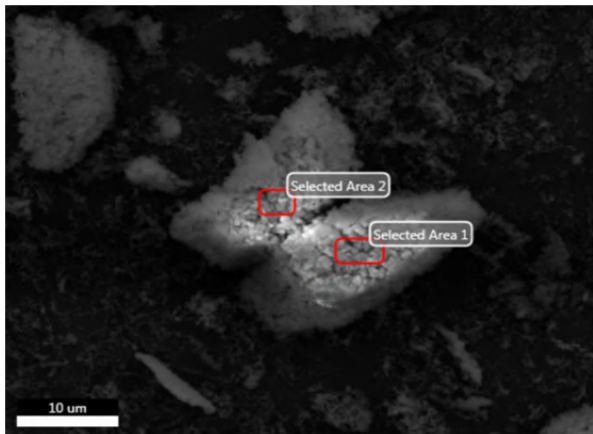
Imágen 51: Difractograma de Rayos X de ceniza de Radal.

18. Anexo IV

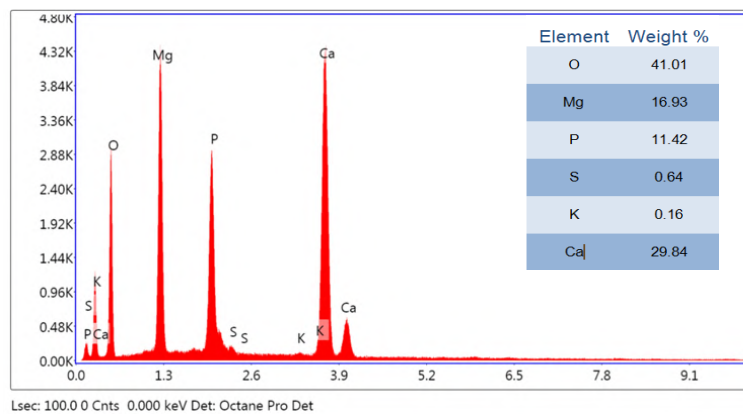
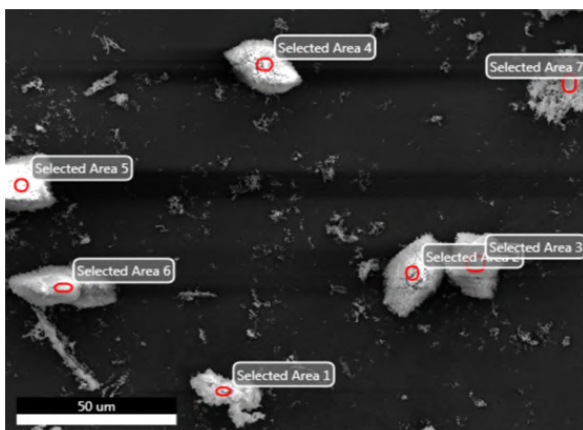
Imágenes y gráficas correspondientes a los resultados de composición y porcentajes de elementos predominantes de las cenizas de cada una de las biomásas analizadas en el presente trabajo.



Imágenes 52: Imagen de ceniza de pino ponderosa a 50μm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).



Imágenes 53: Imagen de ceniza de Ñire a 10μm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).



Imágenes 54: Imagen de ceniza de Coihue a 50μm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).

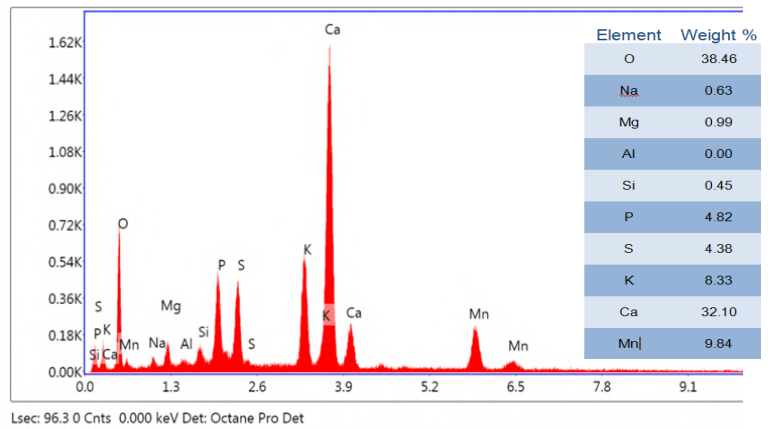
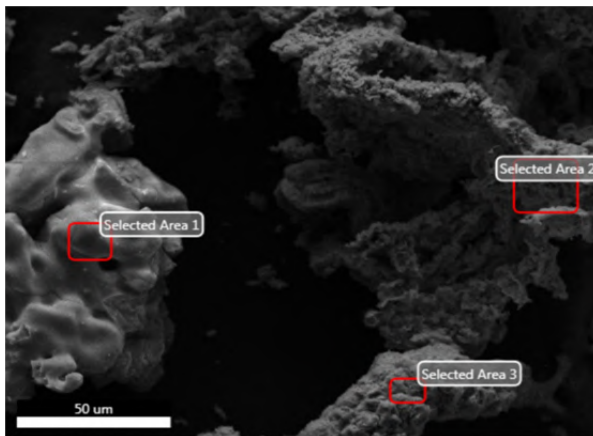
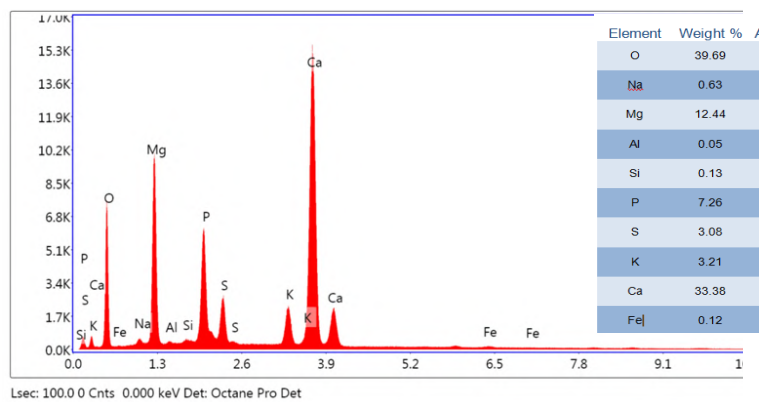
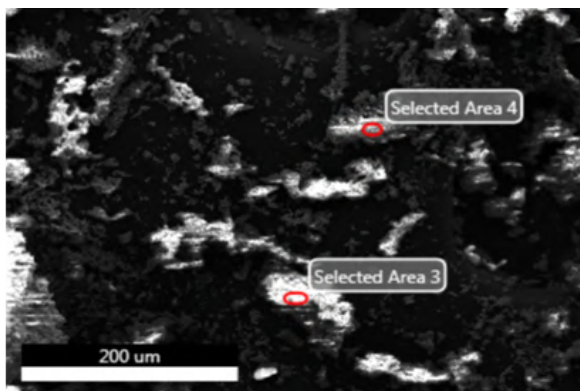


Imagen 55: Imágen de ceniza de Radal a 50µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).



Imágenes 56: Imágen de ceniza de Sauce a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 4).

Imágenes y gráficos correspondientes a los resultados de composición y porcentajes de elementos predominantes de los char de cada una de las biomásas analizadas en el presente trabajo

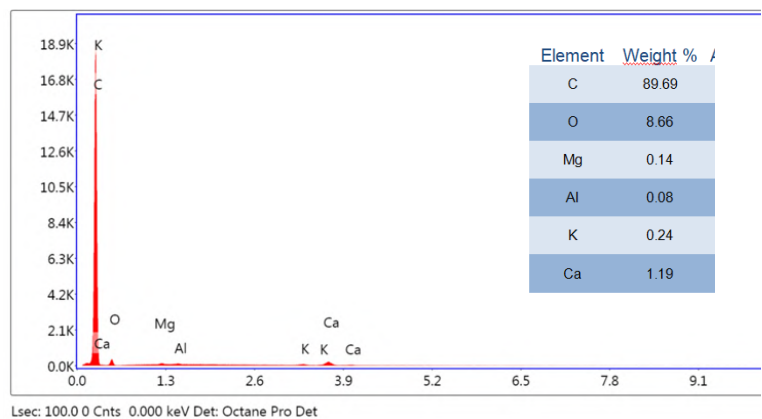
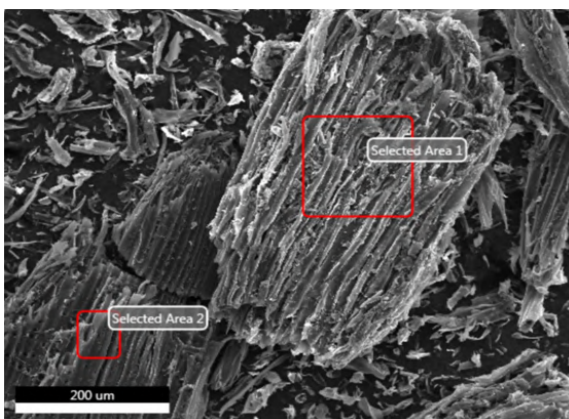


Imagen 57: Imagen de Char de pino ponderosa a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).

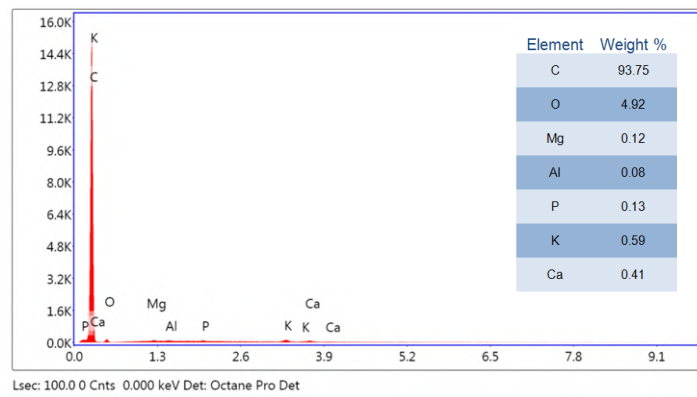
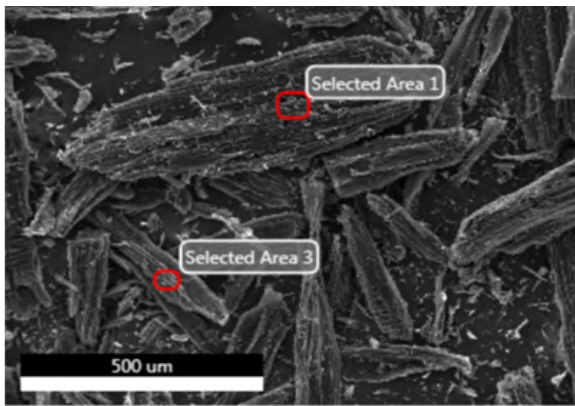


Imagen 58: Imagen de Char de Coihue a 500µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 2).

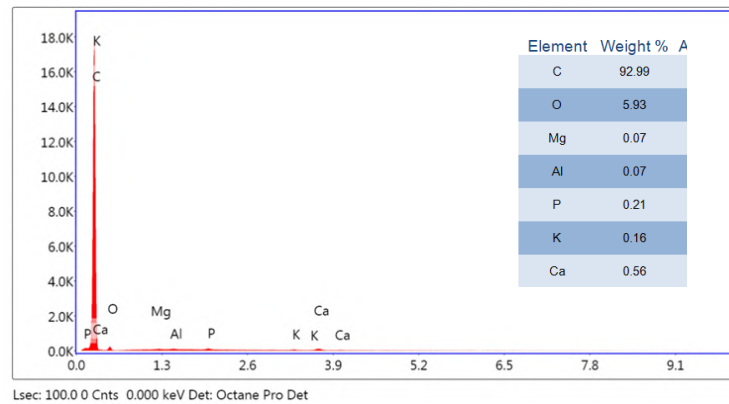
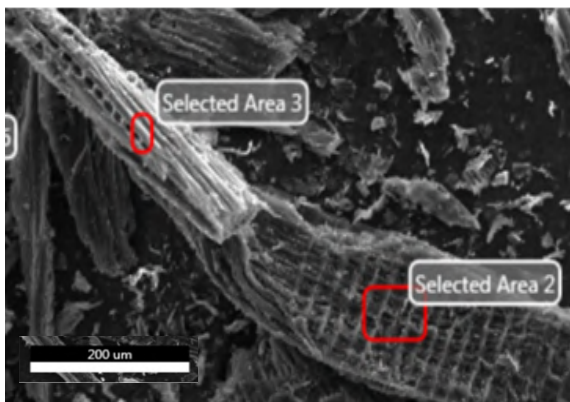


Imagen 59: Imagen de Char de Ñire a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 3).

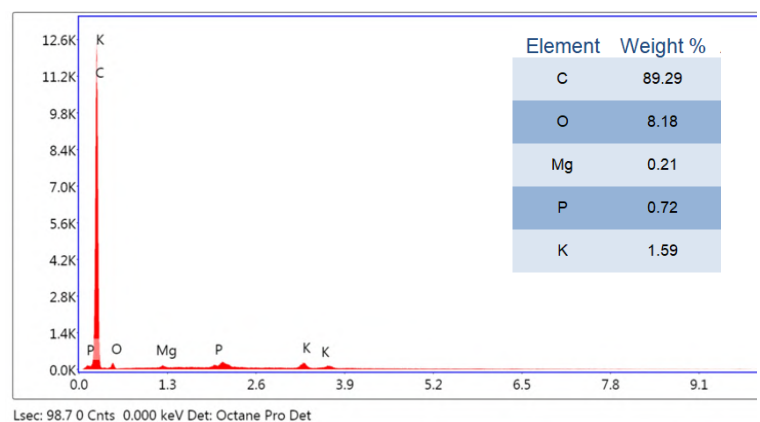
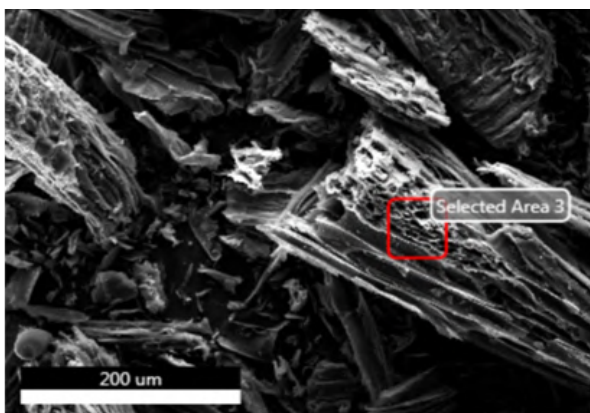


Imagen 60: Imagen de Char de Radal a 200µm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 3).

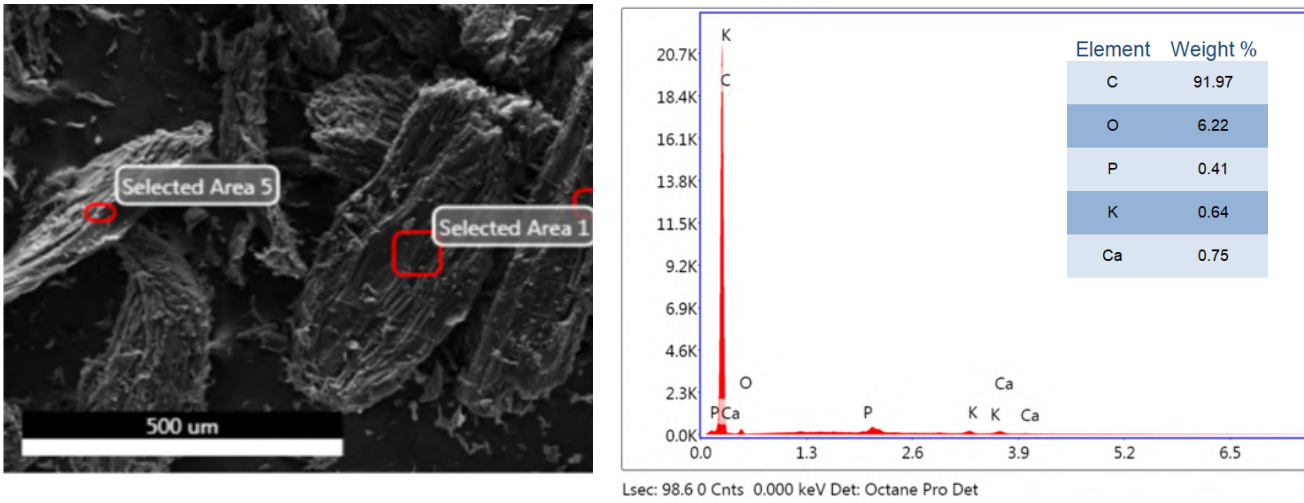


Imagen 61: Imagen de Char de Sauce a 500μm y su correspondiente gráfico que muestra la composición elemental(Área 1).