

## **Evaluación de la emisión de contaminantes atmosféricos derivados de la combustión de diversos tipos de biomasa local en Chile**

**Nicolás Gutiérrez<sup>1,2,\*</sup>, Marcela Muñoz-Catalán<sup>1,2</sup>, Francisco Cabrera<sup>3</sup>, Valeria Olea<sup>1</sup>, Álvaro González-Flores<sup>1</sup>, TOMÁS MORA-CHANDIA<sup>1</sup>, ROBINSON BETANCOURT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de la Frontera, Chile.

<sup>2</sup>Center of Waste Management and Bioenergy, University of La Frontera, Temuco, Chile.

<sup>3</sup>Faculty of Architecture, construction and environment, Autónoma University of Chile, Temuco, Chile.

\* nicolas.gutierrez@ufrontera.cl

### **Resumen**

Se realizó una evaluación y comparación de las emisiones resultantes de la combustión de diversos pellets de biomasa de árboles comúnmente utilizados en el sur de Chile. El objetivo fue evaluar su impacto ambiental estimando la reducción de contaminantes atmosféricos y efectos energéticos en un artefacto de uso domiciliario. Para esta investigación se utilizó una estufa de pellets doméstica de 4.4 kW, y se centró en los efectos de la combustión de cuatro especies de árboles y arbustos prevalentes en el sur de Chile: *Acacia dealbata*, *Nothofagus obliqua*, *Pinus radiata* y *Ulex europaeus*. Evaluando su influencia en las emisiones de material particulado total y factores de emisión de gases de escape, incluyendo CO y NO<sub>x</sub>. También se evaluaron aspectos relacionados con la potencia térmica, eficiencia y temperaturas en la cámara de combustión y los gases de escape. En comparación con *Pinus radiata* (establecido como 100%), se observaron reducciones significativas en las emisiones de partículas, con *Acacia dealbata*, *Nothofagus obliqua* y *Ulex europaeus* mostrando reducciones del 55%, 69% y 58%, respectivamente. Se observaron reducciones de eficiencia del 16%, 32% y 64% para estas mismas especies, respectivamente. Particularmente destacable fue *Acacia dealbata*, que no solo demostró una potencia térmica similar a *Pinus radiata*, sino que también exhibió una notable reducción del 55% en las emisiones de partículas. Además, *Acacia dealbata* mostró un rendimiento superior en las estimaciones de emisión de materia particulada, logrando una reducción sustancial del 72% en comparación con el caso base. Sin embargo, también experimentó un aumento del 25% en CO y un sorprendente aumento del 171% en NO<sub>x</sub>. Estos hallazgos proporcionan una base científica sólida para considerar a *Acacia dealbata* como un recurso valioso dentro de la matriz energética de Chile. El estudio enfatiza su potencial para mitigar significativamente los contaminantes atmosféricos, contribuyendo así a una mejora tangible en la calidad del aire y las condiciones ambientales generales en la región.

**Palabras clave:** Pellet de biomasa, emisión de partículas, factor de emisión, combustión de biomasa, calefacción domiciliaria

### **Abstract**

An evaluation and comparison of the emissions resulting from the combustion of various biomass pellets from trees commonly used in southern Chile was conducted. The objective was to assess their environmental impact by estimating the reduction of atmospheric pollutants and energy effects in a domestic appliance. For this research, a 4.4 kW domestic pellet stove was used, focusing on the combustion effects of four prevalent tree and shrub species in southern Chile: *Acacia dealbata*, *Nothofagus obliqua*, *Pinus radiata*, and *Ulex europaeus*. The study evaluated their influence on total particulate matter emissions and exhaust gas emission factors, including CO and NO<sub>x</sub>. Aspects related to thermal power, efficiency, and temperatures in the combustion chamber and exhaust gases were also evaluated. Compared to *Pinus radiata* (established as 100%), significant reductions in particulate emissions were observed, with *Acacia dealbata*, *Nothofagus obliqua*, and *Ulex europaeus* showing reductions of 55%, 69%, and 58%, respectively. Efficiency reductions of 16%, 32%, and 64% were observed for these same species, respectively. Particularly noteworthy was *Acacia dealbata*, which not only demonstrated similar thermal power to *Pinus radiata* but also exhibited a notable 55% reduction in particulate emissions. Additionally, *Acacia dealbata* showed superior performance in particulate matter emission estimates, achieving a substantial 72% reduction compared to the baseline. However, it also experienced a 25% increase in CO and a surprising 171% increase in NO<sub>x</sub>. These findings provide a solid scientific basis for considering *Acacia dealbata* as a valuable resource within

Chile's energy matrix. The study emphasizes its potential to significantly mitigate atmospheric pollutants, thereby contributing to a tangible improvement in air quality and overall environmental conditions in the region.

**Keywords:** Pellet biomass fuel, particle emissions, emissions factor, biomass combustion, household heating stove

## 1. Introducción

El crecimiento de la población mundial y el aumento de la actividad humana han traído consigo mayores requerimientos y demandas energéticas en áreas como el transporte, la calefacción y la electricidad, elevando el consumo mundial de energía per cápita a 22.3 MWh por año [1]. Este requerimiento implica un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, equivalente a emisiones medias per cápita de 4.86 toneladas por año [2]. Esta actividad antropogénica ha tenido el efecto directo de aumentar la temperatura mundial, en un proceso conocido como cambio climático [3]. Además, otro precursor de este fenómeno climático es el volumen de partículas finas y gruesas emitidas por los procesos de combustión, debido a su composición fisicoquímica y su interacción con la atmósfera. Cuyo efecto de calentamiento surge debido a la absorción de la luz solar por estas partículas, mientras que el enfriamiento resulta de la dispersión de la luz solar, permitiendo que las partículas actúen como núcleos de condensación en las nubes [3]. Muchas investigaciones científicas recientes han dado lugar a descubrimientos que proporcionan información importante para proyectos e iniciativas gubernamentales [4], y para el desarrollo de tecnologías innovadoras que reducirán los impactos ambientales [5], específicamente al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de energía reactiva. Esta búsqueda de nuevas y mejores energías reactivas ha motivado muchos estudios de varios combustibles orgánicos, mencionados por ejemplo en el trabajo de Konur et al. [6] y en revisiones como la de Guo et al. [7] y Van Meerbeek et al. [8], que discuten avances en el uso de biomasa forestal en todo el mundo y aplican estas tecnologías en nuevos procesos de producción para reducir la contaminación local. También se han investigado las propiedades y el uso eficiente de los biocombustibles obtenidos de residuos forestales y agrícolas, como los trabajos de Islas et al. [9] donde se mencionan los principales usos de la biomasa como fuente de energía térmica doméstica e industrial para la generación de energía eléctrica, y Lozano et al. [10] que aborda el potencial energético a través de prácticas sostenibles del uso de residuos agrícolas en la producción de energía térmica. Sin embargo, una desventaja que no se ha resuelto es que las condiciones atmosféricas del área circundante tienen un impacto directo en la composición química y las concentraciones de la biomasa [11], afectando el proceso de combustión e influyendo significativamente en las emisiones de gases y partículas [12, 13]. En

Chile, la contaminación atmosférica ha alcanzado niveles riesgosos para la sociedad, complicando el estado de salud de una gran parte de la población. Esto se debe principalmente al hecho de que el uso de biomasa como combustible representa un gran porcentaje de participación en varias áreas del país. En vista de este problema ambiental actual, se ha publicado una cantidad considerable de investigaciones sobre las propiedades, capacidad y potencial térmico de diferentes biocombustibles orgánicos producidos y utilizados en las diferentes regiones del país; estos incluyen mejoras tecnológicas en estufas domésticas [5], el potencial de la bioenergía derivada de los residuos de cultivos aplicados a sistemas de generación de calor [14], y la generación de electricidad a partir de biomasa [15].

La biomasa para uso doméstico en el país se consume en tres formas: leña, astillas y pellets, siendo la leña la más utilizada. El alto consumo local de biomasa tiene implicaciones para los sistemas de combustión utilizados. Aunque las emisiones dependen tanto de la composición del combustible como del proceso de combustión en sí [16, 17], se ha demostrado que la combustión de pellets produce menores cantidades de material particulado fino (PM) y emisiones de CO, aproximadamente 11-27 y 47 mg/MJ respectivamente, mientras que las emisiones correspondientes de la leña están en los rangos de 110-140 y 2400 mg/MJ [18]. Esto proporciona suficientes bases para considerar los pellets como un combustible adecuado para reducir el impacto ambiental. Ahora, en cuanto al registro de dispositivos de calefacción doméstica que utilizan biomasa a nivel nacional, hay un total de 1,800,000 dispositivos convencionales registrados [19]. Estos dispositivos se utilizan con variabilidad mensual dependiendo de las estaciones en todo el país, con un uso diario promedio de 11 horas. El mayor uso de estos dispositivos se encuentra en las regiones ubicadas en el sur de Chile, donde la temperatura promedio anual es de 9.3°C, en comparación con la temperatura promedio anual en el norte del país, que varía entre 18 y 20°C, y la zona central que varía entre 11 y 15°C [20]. Sin embargo, hacer estimaciones de temperatura más precisas es un desafío debido a la geografía compleja del territorio continental chileno. Esta información es crucial para estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos.

### 1.1. Biomasa como combustible sustentable

En 2014, el gobierno chileno inició un proyecto para reemplazar estufas de leña por estufas de pellets. El objetivo de esta estrategia era reducir la contaminación

del aire, que alcanzó un promedio máximo trianual de  $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la ciudad de Coyhaique entre 2017 y 2019 [21]; esta cifra supera el valor permitido por la ley de calidad del aire, D.S.N° 12/2011, que establece las concentraciones máximas anuales permitidas de material particulado fino y grueso en 20 y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Las principales ventajas de los combustibles de pellets sobre la leña o sus derivados se obtienen a través del proceso de pelletización o fabricación: mejores propiedades de combustión; mayor densidad energética; y mayor facilidad y menores costos en el manejo, transporte y almacenamiento. La industria de pellets en Chile proyecta aumentos en la capacidad de producción instalada en un futuro cercano: a 693,820 toneladas por año en 2025 y 889,820 toneladas en 2030. Esto es para satisfacer un crecimiento exponencial en la demanda de pellets en Chile de alrededor del 900% en los últimos 10 años. Esta demanda se concentra principalmente en pellets para uso industrial, es decir, producidos a partir de residuos forestales y agrícolas. No existen estudios sobre el impacto ambiental generado por el uso de biomasa de diferentes fuentes en la composición de los combustibles de pellets, y esta área necesita ser abordada a corto plazo.

Por consiguiente, hay pocos estudios experimentales enfocados en las características e impactos de los contaminantes de material particulado y gases emitidos por la combustión en estufas domésticas que utilizan biomasa local en el sur de Chile; esta es un área que necesita ser abordada, por lo tanto, el presente trabajo publica los resultados obtenidos para la combustión de pellets de los tipos de biomasa forestal más utilizados en el sur de Chile. Los cuatro tipos de pellets fueron fabricados a partir de troncos de las especies probadas, sin corteza: A. Dealbata, N. Obliqua, P. Radiata y U. Europaeus. Los resultados incluyen las emisiones de gases de combustión y material particulado, así como el comportamiento de la estufa con los diferentes combustibles utilizados. El objetivo es proporcionar información sobre los factores de emisión generados por cada combustible en una estufa que tiene alta demanda, y las perspectivas para su uso futuro en el sur de Chile, con el fin de promover iniciativas ambientales para reducir la contaminación del aire.

## 2. Metodología

La investigación estudió el proceso de combustión en una estufa doméstica con pellets de biomasa hechos de especies de árboles comúnmente utilizados como combustible en el sur de Chile [19]: *Acacia dealbata*, *Nothofagus obliqua*, *Pinus radiata* y *Ulex europaeus*. La estufa era de un tipo disponible en el mercado local: modelo P1500, con una potencia térmica nominal de

4.4 kW, rendimiento del 92.4% y consumo nominal de 1 kg/h (información del fabricante).

### 2.1. Propiedades de la biomasa utilizada en las muestras

Los pellets se fabricaron según el formato estandarizado definido en DIN 51731 Plus (2007), siguiendo las propiedades de análisis elemental y poder calorífico, análisis termogravimétrico (tabla 1) [22, 23]. Los pellets tenían la misma geometría, con un diámetro de  $6 \pm 1$  mm y una longitud de  $20 \pm 5$  mm, y se fabricaron utilizando el mismo procedimiento y tratamiento mecánico, sin ningún agente aglutinante externo.

Tabla 1. Análisis elemental de las muestras utilizadas.

Biomasa	PCI (MJ/kg)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
P. R.	14.7	46.5	5.9	47.3	0.1
A. D.	15.7	45.6	6.3	47.6	0.3
N. O.	17.9	44.8	6.0	48.8	0.2
U. E.	18.5	48.4	6.3	45.1	0.1
	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo (%)	
P. R.	6.1	0.2	77.9	15.7	
A. D.	7.6	0.2	76.4	15.6	
N. O.	6.8	0.2	76.0	17.0	
U. E.	36.2	1.38	58.7	3.72	

### 2.2. Métodos de ensayos

Los experimentos se llevaron a cabo de manera aleatoria con un marco de muestreo previamente establecido. Las condiciones de prueba y los métodos utilizados para extraer partículas y gases de combustión de la estufa se tomaron de las metodologías 5G y DIN EN 14785:2006, como se muestra en la figura 2. La estufa se configuró a la misma potencia, potencia máxima, para todas las pruebas. El combustible se quemó desde la parte superior de la cámara de combustión y las brasas cayeron al crisol de abajo. El consumo se controla mediante estos parámetros (potencia y temperatura), definidos automáticamente para la estufa en su configuración de diseño.

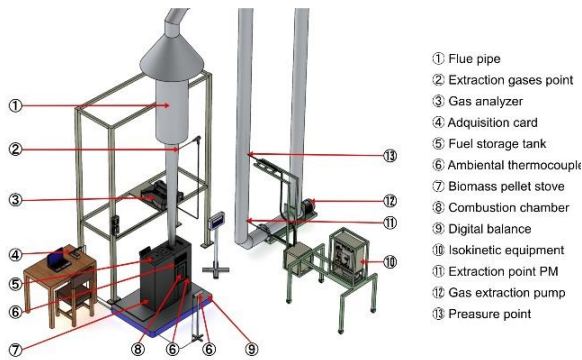


Figura 1. Diseño experimental de las mediciones de partículas y gases. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras de gases de combustión se extrajeron directamente del conducto de humos con un analizador de gases TESTO 350 (2), con muestreo cada 60 segundos; las partículas se extrajeron del conducto de dilución (11) utilizando equipo de muestreo isocinético de Environmental Supply, y se recogieron en filtros de fibra de vidrio, diámetro 110 mm, de Pall Corporation. La velocidad de escape de los gases se midió con el equipo Testo 510 en el mismo punto donde se midieron los gases (2), con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Las pruebas se realizaron con la estufa (7) configurada a máxima potencia para cada ejecución de prueba; se realizaron siete pruebas para cada combustible, proporcionando un total de 14 filtros por tipo de combustible y 56 filtros para todas las pruebas.

Los filtros se recogieron después de una hora, como se establece en los métodos, tras lo cual las muestras se sometieron a medición y análisis gravimétrico. Se utilizaron tres sensores de temperatura de fibra cerámica tipo K para monitorear y registrar temperaturas en la cámara de combustión (8), ventilación de la estufa y espacio ambiental (6). Funcionaban con hardware CompactDAQ 9211, y la información se gestionó con el software Labview 2011, ambos de National Instruments. El termopar colocado en la cámara de combustión no estuvo expuesto a la llama, por lo que no se requirió corrección de temperatura por radiación. La temperatura de los gases de escape se midió con el analizador de gases TESTO (2) con muestreo cada 60 segundos y corrección por convección. La reducción de masa se monitoreó con una balanza digital T-SCALE (9). El tiempo de muestreo equivalía a una medición de cada variable por minuto, según lo establecido en la metodología 5G.

### 2.3. Material particulado, emisión de gases de combustión y factor de emisión

Los cálculos de emisiones de material particulado y gases de combustión, rendimiento y potencia térmica para la estufa se resolvieron en detalle de acuerdo con la metodología 5G y se obtuvieron mediante el trabajo presentado por Betancourt et al. [5].

El factor de emisión [24] representa la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera asociados con la actividad generadora de contaminantes. Así, el factor de emisión para la estufa, derivado de las emisiones promedio de material particulado y gases de combustión (solo CO y NO<sub>x</sub>) por cantidad de combustible, se utilizó para este estudio como se muestra en la siguiente ecuación:

$$EF_{PM} = \frac{E_{adj}}{B} \quad (1)$$

$$EF_{gases} = \frac{C_{gases}}{B} \quad (2)$$

Con  $C_{gases}$  definido en este estudio como:

$$C_{gases} = [CO] \cdot Area \cdot Vel \cdot 3.6 \quad (3)$$

Donde  $[CO]$  es la concentración del gas de interés en mg/m<sup>3</sup>,  $Vel$  es la velocidad de los gases en el conducto con su Área horizontal, multiplicado por un factor para convertir segundos en horas y miligramos en gramos.

### 2.4. Estimación de contaminantes atmosféricos

Para obtener una estimación de la emisión de contaminantes atmosféricos producidos a nivel global, se utiliza la siguiente ecuación [25]:

$$E = Q_{fuel} EF_{PM,gases} \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (4)$$

Donde  $Q_{fuel}$  es el consumo total de combustible,  $EF_{PM,gases}$  es el factor de emisión obtenido para cada gas de combustión según la ecuación (1) y (2), y ER es la eficiencia de eliminación de contaminantes (%), que es la fracción del contaminante que se elimina del flujo de gases de escape antes de que se libere al medio ambiente. Para esta investigación, debido al aparato de combustión utilizado, se asume que no tiene ningún sistema de eliminación de contaminantes, que es la fracción del contaminante que se elimina del flujo de gases de escape antes de que se libere al medio ambiente.

## 3. Resultados

### 3.1. Emisión de material particulado y gases

Las principales emisiones contaminantes encontradas en esta investigación fueron de CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>Total</sub>; los cuales se requieren para obtener el rendimiento de la combustión y los factores de emisión. Estos resultados se muestran en la Tabla 2. El O<sub>2</sub> de referencia utilizado para todas las mediciones de gases fue del 13%, con una incertidumbre asociada no mayor al 5%. Las unidades de concentración mostradas a continuación son las requeridas por las metodologías utilizadas.

Tabla 2. Resumen de las emisiones principales y factor de emisión de cada muestra de biomasa.

	P. R.	A. D.	N. O.	U. E.
PM <sub>T</sub> (g/h)	2.9	1.3	0.9	4.6
EF <sub>PM</sub> (g/kg)	2.7	1.4	1.2	11.4
CO (mg/m <sup>3</sup> N)	1178.0	2072.2	179.1	2031.9
EF <sub>CO</sub> (g/kg)	164.0	372.7	47.0	890.3
NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> N)	89.1	391.4	205.3	564.2
EF <sub>NO<sub>x</sub></sub> (g/kg)	13.7	67.7	54.8	253.6

Basado en la información proporcionada, se tiene que las condiciones de combustión del combustible U. europaeus influyen fuertemente en las emisiones totales de material particulado. Específicamente, las emisiones para este combustible fueron  $4.6 \pm 1.8$  g/h, con un factor de emisión de  $11.4 \pm 3.2$  g/h. La siguiente especie con mayores emisiones fue P. radiata con  $2.9 \pm 0.8$  g/h y  $2.7 \pm 1.2$  g/h, seguida por A. dealbata con  $1.3 \pm 0.1$  y  $1.4 \pm 0.1$  g/h y finalmente N. obliqua con  $0.9 \pm 0.1$  y  $1.2 \pm 0.6$  g/h. El contenido de humedad no es significativo si no supera el  $14 \pm 3.6\%$  en base seca; por encima de ese nivel tiene un efecto significativo en la formación de partículas en la biomasa de U. europaeus [26]. Estas diferencias surgen tanto de la configuración de la estufa en la que se realizaron las pruebas como de la composición química de cada combustible. Roy y Corscadden et al. [27] reportaron factores de emisión de material particulado total en suspensión para pellets compuestos de diferentes tipos de biombras en el rango de 2 a 7 g/h. Además, la EPA [26] ha reportado factores de emisión para combustores domésticos de pellets con valores de 1.9 g/kg para EF<sub>PM</sub>, 17.8 g/kg para EF<sub>CO</sub> y 13.8 g/kg para NO<sub>x</sub>. Aunque las emisiones de partículas de N. obliqua son más bajas que las del combustible base (P. radiata), esta reducción en las emisiones contaminantes no compensa el potencial térmico esperado de la estufa; la única especie donde el resultado es favorable, es decir, se logran bajas emisiones de partículas y el potencial térmico se mantiene cercano al de P. radiata, es A. dealbata. Otra explicación de estos resultados es que el contenido de lignina en la biomasa puede tener una influencia [28], y para esto se demostró que P. Radiata tiene más emisiones que A. Dealbata y N. Obliqua. La mayor variación obtenida en todas las pruebas fue para U. europaeus, seguida de P. radiata y A. dealbata, y finalmente N. obliqua. Estas variaciones están directamente relacionadas con el proceso de combustión, representado tanto por el rendimiento de la estufa como por las temperaturas en la cámara de combustión (ver Figura 5). El comportamiento operacional de la estufa debería estar cerca de lo obtenido con P. radiata, y la gran variación en las temperaturas de la cámara de combustión obtenida con U. europaeus está relacionada con las emisiones de partículas. Por otro lado, no se encontró relación entre las bajas temperaturas obtenidas con A. dealbata y las bajas emisiones de partículas.

Las emisiones de CO indican la cantidad de oxígeno presente en el proceso de reacción durante la combustión. Se registraron diferencias sustanciales entre las pruebas con cada combustible (ver Figura 2). El gráfico muestra las emisiones medias de CO durante el intervalo de prueba de 1 hora.

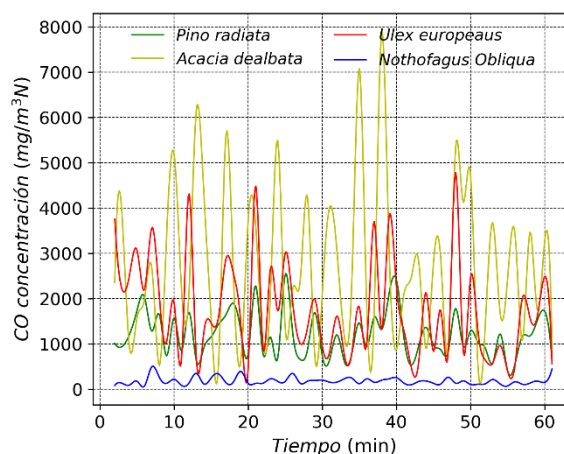


Figura 2. Concentración media de CO emitida a lo largo del tiempo (izquierda) y representación en diagrama de caja (derecha) para cada muestra de combustible. Fuente: Elaboración propia.

Esta variación se debe al hecho de que la estufa utilizada está configurada para un tipo de combustible específico (pellets de P. radiata), que se fabrica para la estufa sobre la base de pruebas. Si se utiliza cualquier otro tipo de combustible, incluso uno basado en biomasa arbóreas, se pueden producir resultados muy diferentes. Por lo tanto, los pellets de P. radiata deben utilizarse como base de comparación. Se observan emisiones variables, particularmente para A. dealbata y U. europaeus, que presentan emisiones más altas que P. radiata en un 43% y 42% respectivamente. N. Obliqua, en contraste, presentó emisiones de CO un 85% más bajas que P. Radiata. Esta diferencia en las emisiones entre los combustibles puede deberse en parte a las concentraciones de carbono celular en cada muestra (ver Tabla 2), ya que se espera que cuanto mayor sea la cantidad de carbono, mayores serán las emisiones de CO. Sin embargo, esto no se aplica en el caso de A. dealbata, que contiene menos carbono (0.85%), pero produjo mayores emisiones de CO; sin embargo, ocurre con U. europaeus, que tiene un mayor contenido de carbono celular (1.87%) y presentó mayores emisiones de CO en todas las pruebas. Además, la variación en las emisiones de U. europaeus y A. dealbata, que presentan picos significativamente más altos que los registrados para P. radiata y N. obliqua. Esta variabilidad se explica por el proceso de combustión, ya que las emisiones aumentan justo después de que el combustible entra en la cámara de combustión; en este momento, el suministro necesario de aire adicional depende del sistema electrónico de la



estufa, que está configurado para un cierto tipo de combustible. Si se está utilizando un combustible con diferentes condiciones o características, el correcto funcionamiento de la estufa se verá obstaculizado. N. obliqua, en contraste, presentó poca variación en las emisiones de CO, que fueron las más bajas y estables registradas en todas las pruebas. Vitoussia et al. [29] reportaron emisiones de combustión de diferentes mezclas de biomasa leñosa camerunesa, con valores entre 543 y 648 mg/m<sup>3</sup>N. Estos resultados son mucho más bajos que los obtenidos en este estudio; sin embargo, la gran diferencia es atribuible al método de muestreo. Dias et al [31] reportaron emisiones de CO con diferentes tipos de pellets en el orden de 250 a 2000 mg/m<sup>3</sup>N, la misma magnitud que los resultados obtenidos en el presente estudio.

Ahora, respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub> se visualiza en la figura 4.

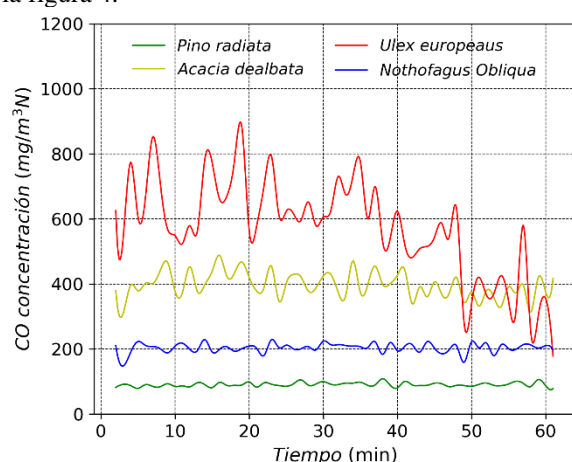


Figura 4: Emisiones medias de NO<sub>x</sub> emitidas a lo largo del tiempo (izquierda) para cada muestra de combustible.

La temperatura de combustión en la estufa nunca excede los 1800 K, el punto en el que el nitrógeno ambiental reacciona con el combustible, dando lugar a NO<sub>x</sub> térmico [29, 31]. Por lo tanto, las emisiones de NO<sub>x</sub> están restringidas únicamente por la concentración de nitrógeno presente en el combustible y son producidas por uno de los otros dos mecanismos: NO<sub>x</sub> rápido producido en el frente de llama y NO<sub>x</sub> presente en el combustible. En esta investigación asumimos la producción de NO<sub>x</sub> debido solo a este último.

Una característica notable de los resultados presentados en la Figura 4 es que U. europaeus presentó la mayor variación en las emisiones de NO<sub>x</sub> entre los combustibles evaluados, debido a las condiciones de combustión dentro de la cámara de combustión. Este comportamiento se explica por el hecho de que a medida que el combustible ingresa en la cámara de combustión, la producción de NO<sub>x</sub> está directamente relacionada con la cantidad de oxígeno presente en el proceso. Para U. europaeus, las emisiones de NO<sub>x</sub> están directamente relacionadas con

el contenido de nitrógeno en el combustible [32], y la mayor cantidad de nitrógeno en la muestra (1.6±0.1) genera las mayores emisiones de NO<sub>x</sub>. P. radiata, en contraste, presentó las emisiones de NO<sub>x</sub> más bajas entre los combustibles evaluados, con 0.64±0.05. N. obliqua y A. dealbata presentaron emisiones intermedias, con 1.2±0.1 y 1.0±0.05 respectivamente. Basado en estos resultados, podemos concluir que la configuración de la estufa y las características del combustible tienen un impacto significativo en las emisiones producidas durante la combustión. Las diferencias en las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>Total</sub> se deben en gran parte a las variaciones en el contenido de carbono y nitrógeno en cada muestra de combustible, así como a la eficiencia de la combustión en la estufa utilizada. En futuras investigaciones, sería útil explorar diferentes configuraciones de estufa y mezclas de combustible para optimizar la combustión y reducir las emisiones contaminantes.

### 3.2. Comportamiento térmico debido a cada combustible de prueba

Los resultados sobre el rendimiento y la eficiencia térmica de cada combustible se muestran en la Tabla 3. Como se mencionó anteriormente, el proceso de combustión de cada combustible es diferente, con una menor potencia térmica producida por N. obliqua (3.4 kW) y U. europaeus (1.8 kW). Sin embargo, hay poco efecto sobre la eficiencia de la combustión, con una diferencia de solo 8% entre el máximo (P. radiata) y el mínimo (A. dealbata). Este comportamiento, como ya se ha señalado, se debe a la configuración de la estufa en la que se llevaron a cabo las pruebas: fue diseñada para pellets de P. radiata, y por lo tanto, el sistema mantendrá las condiciones óptimas de combustión para este combustible, incluso si se está utilizando otro. Aunque la eficiencia de la combustión no se alteró mucho, la potencia térmica de la estufa, en comparación con P. radiata, disminuyó en un 64% para U. europaeus, 32% para N. obliqua y 16% para A. dealbata; así, este último combustible produjo la menor disminución en la potencia térmica. El análisis del comportamiento térmico de la estufa con cada uno de los combustibles probados (Tabla 3) mostró que la temperatura más alta en la cámara de combustión se obtuvo con P. radiata, seguida de N. obliqua, U. europaeus y finalmente A. dealbata.

Tabla 3. Resumen de los resultados del proceso de combustión de cada biomasa.

Biomasa	Potencia térmica (kW)	Eficiencia (%)
P. Radiata	5±1.2	95±2.4
A. Dealbata	4.2±0.1	92±0.9
N. Obliqua	3.4±0.1	94±0.2
E. Europeaus	1.8±0.3	87±8.0
	Cámara de combustión (K)	Gases en chimenea (K)
P. Radiata	734.3±49.6	340.0±12.1

A. Dealbata	540.8±26.6	320.0±8.3
N. Obliqua	674.0±30.8	340.8±7.3
E. Europeaus	590.0±44.4	311.4±6.2

La Figura 5 muestra los resultados de la temperatura media a lo largo del tiempo en la cámara de combustión para cada combustible. Estas variaciones se deben básicamente a los ciclos de recarga de combustible realizados por el equipo durante las pruebas. Las variaciones se muestran en el diagrama de caja y bigotes, con U. europaeus presentando más datos anómalos que N. obliqua y A. dealbata (aproximadamente 10%).

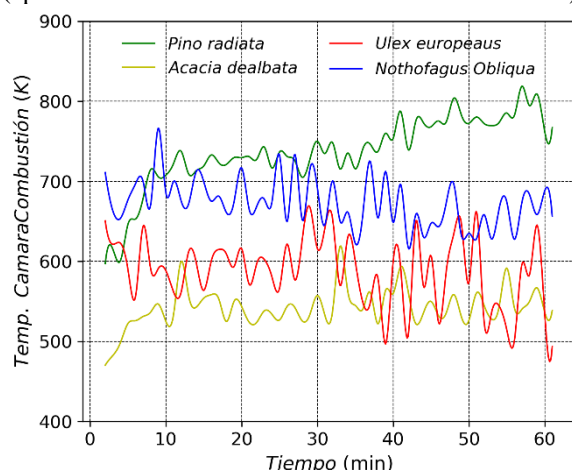


Figura 5: Temperatura media de la cámara de combustión a lo largo del tiempo.

Parte del estudio del comportamiento de la estufa con diferentes combustibles de prueba requiere un parámetro diferente que indique el rendimiento, a saber, la temperatura de los gases de escape. La temperatura media más alta de los gases de escape se encontró para N. obliqua (340 K) y P. radiata (340 K), seguida de A. dealbata (320 K) y finalmente U. europaeus (311 K). Este comportamiento se muestra en la Figura 6, que presenta la temperatura media en la chimenea a lo largo del tiempo en todas las pruebas; las temperaturas de los gases de escape de P. radiata y N. obliqua presentan un comportamiento similar, mientras que los valores para A. dealbata y U. europaeus son aproximadamente un 8% más bajos. Vitoussia et al. [29] reportaron temperaturas de los gases de escape en el rango de 443 a 462 K, más altas que los valores obtenidos en esta investigación.

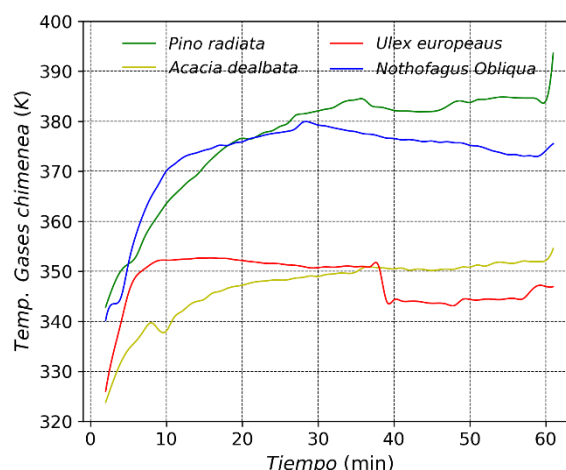


Figura 6: Temperatura media de los gases de escape a lo largo del tiempo.

### 3.3. Estimación del impacto ambiental

Para comprender plenamente la estimación del impacto ambiental generado por el cambio de combustible dentro de la matriz energética doméstica en Chile, es esencial profundizar en el uso histórico de calefactores que emplean biomasa dendroenergética como su fuente de energía principal para los sistemas de calefacción doméstica. Esta comprensión es crucial para tomar decisiones informadas y estratégicas en la búsqueda de un futuro energético más sostenible.

A continuación, se presenta la evaluación detallada del impacto ambiental que resultaría de cambiar de un calefactor de leña convencional a una estufa de pellets. Esta evaluación utiliza el registro existente hasta la fecha actual y se basa en los resultados del factor de emisión para material particulado reportados por Betancourt et al. [5] para estufas de leña convencionales (véase la figura 7). Los resultados revelan que el uso de biomasa de A. dealbata reduce las emisiones de material particulado en un 72% en comparación con P. Radiata en forma de pellets (caso base indicado como la línea azul) y en un 76% en comparación con la leña convencional utilizada en estufas en Chile. Sin embargo, este cambio no tiene el mismo efecto en las emisiones de CO o NO<sub>x</sub>, donde se observa un aumento de aproximadamente 25% y 171%, respectivamente, en comparación con el caso base. Al analizar la biomasa de N. Obliqua, se observa una disminución significativa del 57% en las emisiones totales de material particulado en comparación con P. Radiata y del 63% en comparación con la leña convencional. Aunque el uso de N. Obliqua reduce significativamente las emisiones de CO en un 72% en comparación con el caso base, aumenta las emisiones de NO<sub>x</sub> en un 291%.

En contraste, el uso de *U. Europaeus* aumenta significativamente las emisiones anuales de material particulado total en un 163% en comparación con *Pinus radiata* y en un 123% en comparación con la leña convencional. Esta tendencia se repite en las emisiones de CO y NO<sub>x</sub>, con aumentos del 238% y 1054%, respectivamente. Esto hace que *U. Europaeus* sea una opción inadecuada como combustible dendroenergético. Es importante notar que los comportamientos de emisión entre cada biomasa no son lineales; en algunos casos, las concentraciones totales aumentan, mientras que en otros se observa una reducción completa.

En cuanto a la comparación entre las estimaciones de emisión total y la eficiencia lograda por cada biomasa, los resultados se presentan en la siguiente figura (ver figura 8).

De esta figura, es evidente que *A. Dealbata* exhibe el mejor desempeño en emisiones con una eficiencia cercana al 93%, emitiendo aproximadamente 230 toneladas de material particulado por año. Le sigue *N. Obliqua*, con una eficiencia cercana al 94% y una emisión de 114 toneladas por año. Por otro lado, *U. Europaeus* muestra el peor desempeño, alrededor del 87%, con una emisión de 692 toneladas por año.

En cuanto a las emisiones de CO y la eficiencia, *N. Obliqua* demuestra el mejor desempeño, con una

eficiencia cercana al 94% y una emisión total de 406 toneladas por año. Le sigue *P. Radiata* (caso base), con un desempeño del 95% y una emisión cercana a 1452 toneladas por año. *A. Dealbata*, a pesar de su alta eficiencia del 93%, emite 1809 toneladas por año. Finalmente, *U. Europaeus* muestra un bajo desempeño del 87% y una emisión de 4914 toneladas por año. Estos resultados destacan que el mejor desempeño en emisiones de CO se logra con *Nothofagus obliqua*, representando una reducción del 72% en comparación con el caso base.

En cuanto a las emisiones de NO<sub>x</sub> y la eficiencia de combustión de la biomasa, *Pinus radiata* (caso base) demuestra un alto desempeño y bajas emisiones, seguido de *Acacia dealbata*.

Estos resultados subrayan la importancia crítica de seleccionar cuidadosamente el tipo de biomasa para minimizar el impacto ambiental negativo y contribuir significativamente a una matriz energética doméstica más sostenible en Chile. Tomar decisiones informadas en este sentido puede no solo mejorar la calidad del aire y la salud pública, sino también contribuir sustancialmente a mitigar el cambio climático.

#### 4. Conclusiones

Este estudio evaluó la energía generada y los contaminantes atmosféricos emitidos por una estufa de

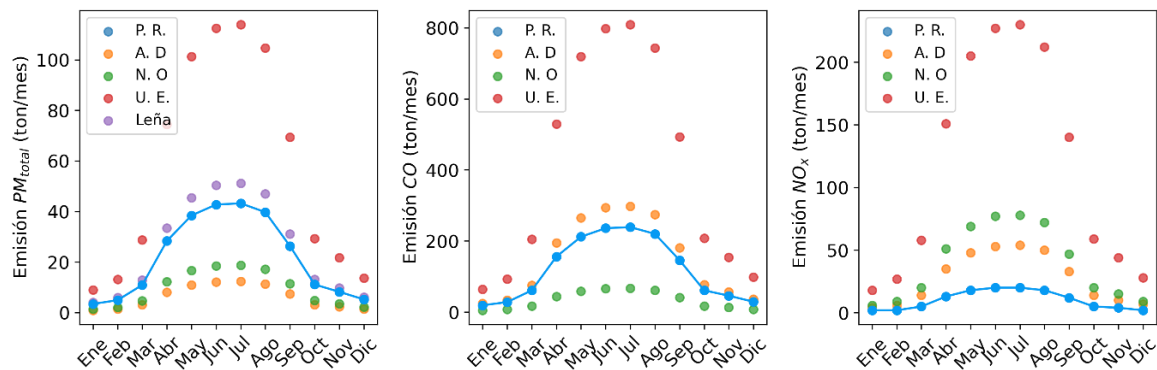


Figura 7. Representación de la estimación del impacto ambiental de PM<sub>Total</sub>, CO y NO<sub>x</sub> para diferentes fuentes de biomasa, respectivamente, durante un período de un año en Chile. Fuente: Elaboración propia.

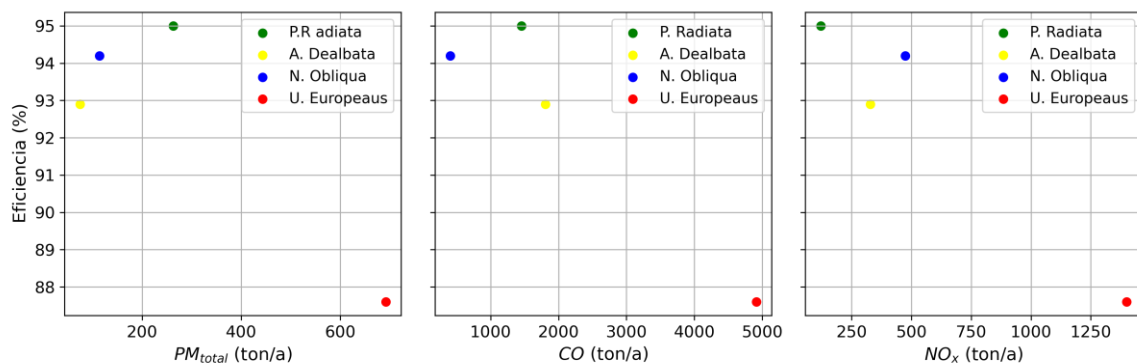


Figura 8. Comportamientos de la eficiencia frente a las emisiones anuales totales de cada biomasa probada.



pellets utilizando diferentes tipos de biomasa disponibles localmente en el sur de Chile (*Nothofagus obliqua*, *Acacia dealbata*, *Pinus radiata* y *Ulex europaeus*). Además, estimó el impacto ambiental producido al implementar estas biomasa como combustibles en Chile, considerando el inventario nacional de calefactores de biomasa. Las emisiones de contaminantes y partículas variaron ampliamente entre los combustibles probados.

Las emisiones más bajas de CO fueron producidas por *N. obliqua*, seguidas en orden ascendente por *P. radiata*, *U. europaeus* y *A. dealbata*. El orden para las emisiones de NO<sub>x</sub> fue *P. radiata* seguida en orden ascendente por *N. obliqua*, *A. dealbata* y *U. europaeus*. Las emisiones más bajas de CO<sub>2</sub> fueron producidas por *U. europaeus*, seguidas por *A. dealbata*, *N. obliqua* y *P. radiata*. Finalmente, las emisiones más bajas de partículas fueron producidas por *N. obliqua*, seguidas por *A. dealbata*, *P. radiata* y *U. europaeus* en orden ascendente.

La eficiencia de la combustión fue similar para tres de los cuatro combustibles probados; el *U. europaeus* puro no demostró ser un buen combustible para la combustión en pellets. Solo dos de los cuatro combustibles probados, *P. radiata* y *A. dealbata*, proporcionaron un nivel satisfactorio de potencia térmica; sus comportamientos térmicos fueron bastante similares.

Tanto *U. europaeus* como *N. obliqua* mostraron grandes variaciones en sus procesos de combustión, lo que los hace poco atractivos como fuentes de combustible para pellets. Por otro lado, el uso de *Acacia dealbata* como combustible para pellets es una opción prometedora para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos, ya que mostró emisiones de partículas más bajas (49%) que *Pinus radiata*.

*Acacia dealbata* demostró un mejor rendimiento en las estimaciones de emisión de material particulado, reduciendo en un 72% en comparación con el caso base, con un aumento del 25% en CO y un aumento del 171% en NO<sub>x</sub>. A pesar de los aumentos en las estimaciones anuales, la reducción del material particulado sigue siendo predominante en las estrategias para reducir la contaminación del aire.

Estos resultados destacan que *Acacia dealbata*, un árbol común en el sur de Chile, es una alternativa viable y complementaria de biomasa para la producción de pellets con fines energéticos.

## 5. Referencias

- [1] H. Ritchie, M. Roser. "CO and Greenhouse Gas Emissions". 2020. URL <https://ourworldindata.org/energy>
- [2] Saier, M. H. (2007). Climate change, 2007. Water, Air, and Soil Pollution, 181(1–4), 1–2. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6>
- [3] I. Dafnomilis, R. Hoefnagels, et al. "Review of solid and liquid biofuel demand and supply in Northwest Europe towards 2030 – A comparison of national and regional projections". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 78, pp. 31–45, April 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.108>
- [4] R. Hoefnagels, G. Resch, et al. "International and domestic uses of solid biofuels under different renewable energy support scenarios in the European Union". Applied Energy, vol. 131, pp. 139–157, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.065>
- [5] R. Betancourt Astete, N. Gutiérrez, et al. "Direct improvement in the combustion chamber and the radiant surface to reduce the emission of particles in biomass cooking stoves used in Araucanía, Chile". Sustainability (Switzerland), vol. 13, n.º 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13137205>
- [6] O. Konur. "The scientometric evaluation of the research on the production of bioenergy from biomass". Biomass and Bioenergy, vol. 47, pp. 504–515, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.047>
- [7] M. Guo, W. Song, "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, pp. 712–725, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- [8] Van Meerbeek K, Muys B, (2019) Lignocellulosic biomass for bioenergy beyond intensive cropland and forests. Renewable and Sustainable Energy Reviews (May 2018):139–149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.009>
- [9] J. Islas, F. Manzini, O. "Solid biomass to heat and power". Elsevier Inc., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2>, URL <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2>
- [10] F.J. Lozano, R. Lozano. "Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production". Journal of Cleaner Production, vol. 172, pp. 4162–4169, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.037>

- [11] S.V. Vassilev, D. Baxter, et al. "An overview of the chemical composition of biomass". *Fuel*, vol. 89, n.º 5, pp. 913-933, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- [12] J.D. McDonald, B. Zielinska, et al. "Fine particle and gaseous emission rates from residential wood combustion". *Environmental Science and Technology*, vol. 34, n.º 11, pp. 2080-2091, 2000. <https://doi.org/10.1021/es9909632>
- [13] G. Shen, S. Tao, et al. "Reductions in emissions of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of biomass pellets in comparison with raw fuel burning". *Environmental Science and Technology*, vol. 46, n.º 11, pp. 6409-6416, 2012. <https://doi.org/10.1021/es300369d>
- [14] C. Román-Figueroa, N. Montenegro, M. Paneque. "Bioenergy potential from crop residue biomass in Araucania Region of Chile". *Renewable Energy*, vol. 102, pp. 170-177, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.013>
- [15] C. Rodríguez-Monroy, G. Mármol-Acitores, "Electricity generation in Chile using non-conventional renewable energy sources – A focus on biomass". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 937-945, September 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.059>
- [16] J.S. Reid, T.F. Eck, et al. "A review of biomass burning emissions part III: Intensive optical properties of biomass burning particles". *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5, n.º 3, pp. 827-849, 2005. <https://doi.org/10.5194/acp-5-827-2005>
- [17] L.S. Johansson, B. Leckner, et al. "Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets". *Atmospheric Environment*, vol. 38, n.º 25, pp. 4183-4195, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>
- [18] O. Sippula, J. Hokkinen, et al. "Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers". *Atmospheric Environment*, vol. 43, n.º 32, pp. 4855-4864, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.022>
- [19] Chilean Construction Chamber. "Measurement of National Consumption of Firewood and Other Solid Fuels Derived from Wood; Technical Report". Ministry of Energy, Santiago, Chile, 2015. [PDF].
- [20] Climate Change Office of the General Directorate of Civil Aviation (DGAC). "Annual Report on the Evolution of Temperature in Chile". Tech. rep., 2021. [PDF].
- [21] Ministry of Environment. "State of the Environment Report". Tech. rep., Ministry of Environment, Santiago, Chile, 2020. [PDF].
- [22] H. Pesenti, M. Torres, P. Oliveira, et al. "Exploring *Ulex europaeus* to produce nontoxic binderless fibreboard". *BioResources*, vol. 12, n.º 2, pp. 2660-2672, 2017. <https://doi.org/10.15376/BIORES.12.2.2660-2672>
- [23] H. Mansilla, R. Garcia, et al. "Chemical characterization of Chilean hardwoods". *Wood Science and Technology*, vol. 25, n.º 2, pp. 145-149, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00226814>
- [24] T. Nussbaumer, C. Czasch, et al. "Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries". January 2008.
- [25] EPA. "AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 1: External Combustion Sources Residential Wood Stoves". (x):1-10, 2022. [PDF].
- [26] V. Dupont, M. Pourkashanian, et al. "The reduction of NO<sub>x</sub> formation in natural gas burner flames". *Fuel*, vol. 72, n.º 4, pp. 497-503, 1993. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(93\)90108E](https://doi.org/10.1016/0016-2361(93)90108E)
- [27] M.M. Roy, K.W. Corscadden. "An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove". *Applied Energy*, vol. 99, pp. 206-212, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.05.003>
- [28] S. Amaral, A. Carvalho. "Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: Chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions". *Bioresource Technology*, vol. 164, pp. 55-63, 2014.
- [29] T. Vitoussia, G. Leyssens, et al. "Analysis of the combustion of pellets made with three Cameroonian biomass in a domestic pellet stove". *Fuel*, vol. 276, November 2019, p. 118105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118105>
- [30] J. Dias, M. Costa. "Test of a small domestic boiler using different pellets". *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, n.º 6, pp. 531-539, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.002>
- [31] J. Werther, M. Saenger, et al. "Combustion of agricultural residues". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 26, n.º 1, pp. 1-2, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2)