



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Forestales
Programa de Doctorado en Ciencias Forestales

**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE DIFERENTES ESPECIES CON
POTENCIALES ENERGÉTICOS PARA LA ELABORACIÓN DE *PELLETS* DE
CALIDAD CON FINES ENERGÉTICOS**



Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Forestales

HECTOR JESUS PEGORETTI LEITE DE SOUZA

Profesor Guía: Fernando Muñoz Sáez
Departamento de Silvicultura
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción

CONCEPCIÓN, CHILE
Agosto 2020

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE DIFERENTES ESPECIES CON
POTENCIALES ENERGÉTICOS PARA LA ELABORACIÓN DE *PELLETS* DE
CALIDAD CON FINES ENERGÉTICOS

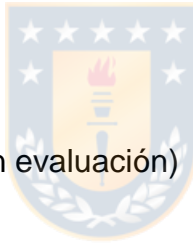
Comisión Evaluadora:

Fernando Muñoz Sáez (Profesor guía)
Ingeniero Forestal, Dr.

Regis Teixeira Mendonça (Profesor co-guía)
Ingeniero Químico, Dr.

Cristina Segura Castillo (Comisión evaluación)
Ingeniera Química, Dra.

Katia Sáez Carrillo (Comisión evaluación)
Ciencias químicas, Dra.



Directora de Postgrado:

Darcy Ríos Leal
Profesora de Biología y Química, Dra.

Decano Facultad de Ciencias Forestales:

Manuel Sánchez O.
Ingeniero Forestal, Dr.



A Maricarmen Maola, mi esposa

A Valentina Pegoretti, mi hija

A mis padres, João Leite de Souza y Diva Pegoretti de Souza

Mariela Piñero († 2020) y Luis Herrera

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi esposa Maricarmen quien me ha acompañado a lo largo de esta etapa apoyándome incondicionalmente. A mi hija Valentina quién llegó alegrarnos la vida e impulsarme a seguir luchando para alcanzar el objetivo. A mis padres que siempre me apoyaron y estimularon a realizar este logro. A ellos toda mi gratitud.

Mi tutor Dr. Fernando Muñoz no solamente por su guía, revisiones, comentarios y consejos sino por toda la ayuda tanto en la parte académica como personal hacia mi familia desde mí llegada a Chile, fundamental para nuestra adaptación y así sentirnos como en casa.

A mi co-tutor Dr. Regis Teixeira Mendonça por sus lecciones y por estar siempre presente durante toda esta jornada, y también al grupo de trabajo del Laboratorio de Química de la Madera del Centro de Biotecnología.

A la Dra. Cristina Segura y al equipo del área de Bioenergía de la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT), por la disposición de la peletizadora y toda la ayuda y el conocimiento adquirido durante este periodo.

A la Dra. Katia Sáez por su valioso apoyo y aporte en el desempeño de mi trabajo de tesis.

Al Dr. Rodrigo Olave del Agri-Food and Biosciences Institute, Northern Ireland, por su disposición, ayuda y realización de análisis.

Al Dr. Roque Rodríguez Soalleiro y su equipo de investigación de la Universidad Santiago de Compostela (campus Lugo) por su atención y por hacer mi estadía una excelente estancia en Galicia – España.

Asimismo, agradecer el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo VRID N° 218.142.036-1.0, la Facultad de Ciencias Forestales y Dirección de Postgrado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	2
1.2. MATERIA PRIMA COMO FUENTE PARA LA PRODUCCIÓN DE <i>PELLETS</i>	7
1.3. TRASFORMACIÓN Y PELETIZACIÓN DE LA BIOMASA.....	13
1.4. PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS <i>PELLETS</i>	15
1.5. HIPÓTESIS	18
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
2. CAPÍTULO II. POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE <i>Paulownia</i> Y <i>Miscanthus</i> PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CHILE	20
RESUMEN.....	20
2.1. INTRODUCCIÓN	21
2.2. OBJETIVOS.....	25
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.3.1. BIOMASA.....	26
2.3.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LA BIOMASA.....	28
2.4. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO.....	30

2.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	31
2.6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
2.6.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE <i>Paulownia elongata x fortunei</i>	32
2.6.2.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE <i>Miscanthus x giganteus</i>	36
2.6.3.	ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).....	43
2.6.4.	CARACTERÍSTICAS TERMOGRAVIMÉTRICAS DE <i>P. elongata x fortunei</i> Y <i>Miscanthus x giganteus</i>	46
2.7.	CONCLUSIONES.....	51
3.	CAPÍTULO III. INFLUENCE OF LIGNIN DISTRIBUTION, PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND MICROSTRUCTURE ON THE QUALITY OF BIOFUEL PELLETS MADE FROM FOUR DIFFERENT TYPES OF BIOMASS.	53
	ABSTRACT.....	53
3.1	INTRODUCTION.....	54
3.2	MATERIALS AND METHODS.....	57
3.2.1	BIOMASS.....	57
3.2.2	PHYSICAL, CHEMICAL, AND ENERGETIC CHARACTERIZATION OF THE BIOMASS.....	58
3.2.3	PELLET PRODUCTION AND EVALUATION.....	60
3.2.4	ENERGY PERFORMANCE INDEX (FUEL VALUE INDEX - FVI)	61

3.2.5	MICROSCOPIC IMAGING	62
3.3.	STATISTICAL ANALYSES	64
3.4.	RESULTS AND DISCUSSION	65
3.4.1.	PHYSICAL, CHEMICAL, AND ENERGY CHARACTERISTICS OF THE BIOMASSES.....	65
3.4.2.	PHYSICAL, CHEMICAL, AND ENERGY CHARACTERISTICS OF PELLETS	69
3.4.3.	CORRELATIONS BETWEEN THE CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMASS AND ENERGY CHARACTERISTICS OF PELLETS.....	72
3.4.4.	FUEL INDEX (FUEL VALUE INDEX - FVI)	75
3.4.5.	MICROSTRUCTURE AND DISTRIBUTION OF LIGNIN IN THE PELLETS.....	77
3.4.6.	QUALITY OF WOOD AND NON-WOODY PELLETS FOR ENERGETIC USE, IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL STANDARDS	84
3.5.	CONCLUSIONS.....	87
4.	CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE TORREFACCIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE CUATRO ESPECIES CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA	88
	RESUMEN.....	88
4.1.	INTRODUCCIÓN	89

4.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	92
4.2.1.	BIOMASA.....	92
4.2.2.	CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA	93
4.3.	PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE <i>PELLETS</i>	95
4.4.	TORREFACCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS <i>PELLETS</i>	96
4.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	97
4.6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	97
4.6.1.	VALORES ENERGÉTICOS DE LA BIOMASA <i>IN NATURA</i> Y <i>PELLETS</i>	97
4.6.2.	ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS MENORES EN LOS <i>PELLETS</i> TORREFACTADOS	102
4.6.3.	VALORES QUÍMICOS DEL MATERIAL <i>IN NATURA</i> , <i>PELLETS</i> Y POST TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS <i>PELLETS</i>	105
4.6.4.	CARACTERÍSTICAS DE PÉRDIDA DE MASA, RENDIMIENTO EN ENERGÍA Y CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS CUATRO ESPECIES DE <i>PELLETS</i> TORREFACTADOS	112
4.7.	CONCLUSIONES.....	116
5.	CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL	117
6.	CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES GENERALES	121
	BIBLIOGRAFÍA.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE ORDENACIÓN DE VARIABLES ORIGINALES Y SCORES DE LAS TRES PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES	46
FIGURA 2.2. CURVAS DE TG (A) Y DTG (B) DE LA <i>PAULOWNIA ELONGATA</i> X <i>FORTUNE</i> Y <i>MISCANTHUS GIGANTEUS</i>	48
FIGURE 3.1. DIMENSIONS AND AREAS WHERE THE PELLET IMAGES WERE OBTAINED FOR THE FOUR SPECIES	62
FIGURE 3.2. (A) CORRELATIONS BETWEEN VOLATILE, EXTRACTIVES, AND (B) TOTAL LIGNIN CONTENTS OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS PELLETS IN CHILE.....	71
FIGURE 3.3. CORRELATIONS BETWEEN CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMASS, LIGNIN (A), AND ASH (B), AND THE ENERGETIC CHARACTERISTICS OF PELLETS (HHV)	72
FIGURE 3.4. A) HIGHER HEATING VALUE (HHV) OF PELLETS AND EXTRACTIVES (EXT), TOTAL LIGNIN (TL) AND CARBON (C) CONTENTS OF BIOMASSES. B) CORRELATION BETWEEN HIGHER HEATING VALUE (HHV), TOTAL LIGNIN CONTENT (TL) AND CARBON CONTENT (C)	73
FIGURE 3.5. CORRELATIONS BETWEEN CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMASS, CARBON (A) AND OXYGEN (B) AND THE ENERGETIC CHARACTERISTICS OF PELLETS (HHV)	74

FIGURE 3.6. CORRELATIONS BETWEEN CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BIOMASS, CHLORINE (A) AND CARBON (B) AND THE ENERGY CHARACTERISTICS OF PELLETS (HHV AND FVI2).....	75
FIGURE 3.7. MICROSCOPIC IMAGES OF SWEEPS OF THE RAW SPECIES AND THE CROSS SECTION IN PELLETS.....	79
FIGURE 3.8. RELATION BETWEEN CLEAR AREAS IN THE PELLETS AND TOTAL LIGNIN CONTENT	80
FIGURE 3.9. LIGNIN DISTRIBUTION IN THE CROSS SECTION OF THE PELLETS THROUGH THE CONFOCAL FLUORESCENCE MICROSCOPY.....	82
FIGURA 4.1. VALORES PROMEDIOS DE LOS PODERES CALORÍFICOS LÍQUIDOS (PCL) SEGÚN TRATAMIENTO DE TORREFACCIÓN.....	100
FIGURA 4.2. CONSUMO ENERGÉTICO (KWH) DE LOS <i>PELLETS</i> EN EL PROCESO DE TORREFACCIÓN	102
FIGURA 4.3. <i>PELLETS IN NATURA</i> Y DESPUÉS DEL PROCESO TÉRMICO PARA LAS DIFERENTES TEMPERATURAS ESTUDIADAS.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. RANGOS DE LOS PARÁMETROS IMPORTANTES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL <i>PELLET</i>	12
TABLA 1.2. PARÁMETROS DE CALIDAD PARA <i>PELLETS</i> ESTABLECIDOS POR LAS NORMAS ALEMANAS	16
TABLA 2.1. UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE <i>PAULONIA ELONGATA X FORTUNEI</i> Y <i>MISCANTHUS X GIGANTEUS</i>	27
TABLA 2.2. TRATAMIENTOS, ESPECIES Y ORIGEN DE LAS ESPECIES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.....	28
TABLA 2.3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA <i>PAULOWNIA ELONGATA X FORTUNEI</i>	34
TABLA 2.4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL <i>MISCANTHUS X GIGANTEUS</i>	41
TABLA 2.5. AUTOVECTORES (E) Y LAS CORRELACIONES (R) ENTRE LAS VARIABLES ORIGINALES Y LAS CUATRO PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES.....	44
TABLA 2.6. TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN TÉRMICA Y SU RESIDUO (CHAR) A 600 °C DE <i>PAULOWNIA</i> Y <i>MISCANTHUS</i>	49
TABLA 2.7. CLASIFICACIÓN DE LAS BIOMASAS DE ACUERDO CON LAS NORMAS DE CALIDAD	51
TABLE 3.1. SOURCE AND CHARACTERISTICS OF THE SPECIES SAMPLES UNDER STUDY	58

TABLE 3.2. PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF THE BIOMASSES OF THE FOUR SPECIES STUDIED	65
TABLE 3.3. ENERGY PARAMETERS OF THE PELLETS IN THE FOUR SPECIES STUDIED	70
TABLE 3.4. HIGHER HEATING VALUE (HHV), MOISTURE CONTENT (MC), BULK DENSITY (BD), ASH CONTENT (AC), FUEL VALUE INDEX (FVI), AND RANKING OF FOUR SPECIES ON THE BASIS OF FVI.....	76
TABLE 3.5. CHARACTERISTICS OF THE PARAMETERS OF CRACKS AND NON-CRACKED (CLEAR AREAS).....	78
TABLE 3.6. PELLET PROPERTIES AND PRODUCTION SPECIFICATION FOR DOMESTIC AND INDUSTRIAL USE.....	85
TABLA 4.1. UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO	93
TABLA 4.2. VALORES ENERGÉTICOS DE LAS BIOMASAS Y <i>PELLETS</i> SEGÚN ESPECIE.....	98
TABLA 4.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS MENORES DE LAS CUATRO ESPECIES TORREFACTADAS.....	104
TABLA 4.4. ANÁLISIS QUÍMICOS DE LAS CUATRO ESPECIES CONSIDERADAS EN LOS ENSAYOS DE TORREFACCIÓN.....	106
TABLA 4.5. VALORES DE HUMEDAD, PÉRDIDA DE MASA, RENDIMIENTO EN MASA, RENDIMIENTO EN ENERGÍA Y CONSUMO ENERGÉTICO DE LOS <i>PELLETS</i> TORREFACTADOS.....	113

ÍNDICE DE FÓRMULAS

FÓRMULA 2.1. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	30
FÓRMULA 2.2. PODER CALORÍFICO LÍQUIDO O ÚTIL (PCL).....	30
FÓRMULA 2.3 DENSIDAD ENERGÉTICA A GRANEL (DE _G).....	30
FÓRMULA 3.1. LOWER HEATING VALUE (LHV)	60
FÓRMULA 3.2. NET HEATING VALUE (NHV).....	60
FÓRMULA 3.3. NET ENERGY DENSITY (NED).....	60
FÓRMULA 3.4. FUEL VALUE INDEX (FVI ₁)	62
FÓRMULA 3.5. FUEL VALUE INDEX (FVI ₂)	62
FÓRMULA 4.1. PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	94
FÓRMULA 4.2. PODER CALORÍFICO LÍQUIDO O ÚTIL (PCL).....	95
FÓRMULA 4.3. DENSIDAD ENERGÉTICA LIQUIDA (DEL)	95
FÓRMULA 4.4. RENDIMIENTO EN ENERGÍA (RE)	97

RESUMEN

Los *pellets* son biocombustibles sólidos cuyo uso se viene incrementando rápidamente a nivel mundial, principalmente para la producción de energía térmica. Para el caso de Chile, el panorama no es diferente en el aumento de la demanda de este biocombustible se debe a la mayor aceptación por parte de los consumidores y debido a Planes de Descontaminación y a los Planes de Reconversión de estufas a base de leña a estufas a base de *pellets* que impulsa el Estado de Chile. Actualmente este biocombustible se elabora con los residuos de las cosechas forestales (principalmente pino radiata) y material residual proveniente de los aserraderos. Esta materia prima también compite por su uso en plantas termoeléctricas a base de biomasa. De allí que la búsqueda de otras especies es fundamental, tanto para el suministro como para ampliar la gama de especies que se utilizan. En esta investigación se estudió el uso de distintas especies (leñosas y no leñosas) con potencial energético y el efecto de la distribución de la lignina sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de los *pellets*, como también de las ventajas de un tratamiento térmico (torrefacción), que mejora las propiedades energéticas del biocombustible. Este proceso también ayuda a reducir el porcentaje de cloro, parámetro muy controversial y excluyente para las especies, según normas internacionales, permitiendo el uso de especies descartadas que poseen buen potencial energético. Los *pellets* provenientes de *P. radiata* y *E. nitens* presentaron mejores propiedades para la producción de bioenergía que los provenientes de *Paulownia* y *Miscanthus*.

ABSTRACT

The utilization of pellets as solid biofuels has been increasing worldwide, especially for heat and power purposes. This trend has been similar in Chile, where an increasing demand has occurred due to a higher acceptance of this biofuels by consumers, due to the Decontamination Plans and the Reconversion Plans of wood-based stoves to pellet based stoves promoted by the State of Chile. Currently, this biofuel is produced with residues produced from forest harvesting operations (pine) and sawmills. However, these raw materials are also used in combined heat and power (CHP) plants. Hence, searching for other species and raw materials is fundamental to ensure a continuous supply and to increase the variety of species used in biofuels production. This research investigated the potential use of different biomasses (woody and non-woody) for bioenergy production, as well as the effects of lignin distribution in the physical-chemical and mechanical properties of the pellets. Additionally, the advantages of a thermal treatment (torrefaction), which improves the biofuel energy properties, was also evaluated. This process contributes to the reduction of chlorine percentage, allowing the use of species with good energetic potential but previously discarded due to international regulations that exclude their use according to the chlorine percentage. Pellets from *P. radiata* and *E. nitens* had better properties for bioenergy production than those from *Paulownia* and *Miscanthus*.

1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Esta tesis fue estructurada en capítulos, los cuales se describen a continuación. En el capítulo I, se presentan los antecedentes generales, descripción de la materia prima como fuente para la fabricación de *pellets*, como también los parámetros de calidad según normas internacionales. Además, incluye la hipótesis, objetivos y la estructura de la tesis.

El capítulo II tuvo como objetivo evaluar el potencial físico-químico y energético, y perfiles térmicos de la biomasa de dos especies (*Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*) recolectada en tres sitios contrastantes de la zona centro sur de Chile.

El capítulo III presenta la evaluación de las propiedades a microescala que influyen en la calidad de los *pellets*, mediante técnicas de microscopias (SEM y CLSM), para su integración en un índice de combustibilidad (FVI) que permita clasificar cuatro especies con potencial energético (*Paulownia*, *Miscanthus*, eucalipto y pino).

El capítulo IV tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes temperaturas (210, 250 y 290°C) y tiempos (10, 20 y 30min) de torrefactado sobre las propiedades físico-químicas y energéticas de las cuatro especies con potencial energético para la producción de energía térmica, según normas internacionales de calidad (DIN EN 14961-2).

En el capítulo VI y VII se presenta la discusión general y las conclusiones generales de la tesis, respectivamente.

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

Los impactos ambientales y el cambio climático provocados por la acción humana ya son una realidad, principalmente debido al consumo de combustibles fósiles. Esto ha alentado ambiciosos esfuerzos de varios países del mundo, especialmente de la Unión Europea (UE), con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta 2030, sustituyendo gradualmente derivados del petróleo por fuentes de energía renovables, especialmente biomasa sólida, un hecho que fue ratificado en la COP 25 en el año 2019. Debido a esto, la valorización de los recursos energéticos de una matriz renovable es uno de los principales objetivos de la política energética mundial, para así minimizar las emisiones que intensifican los gases de efecto invernadero y el cambio climático.

Se estima que la mayor parte de la demanda de biomasa de la Comunidad Europea (UE) para 2050 será a partir de biomasa sólida vegetal, con 4,996 pJ (Scarlat *et al.*, 2015). La biomasa vegetal sólida más popular es el *pellet*, cuyo consumo en la UE ha crecido significativamente, debido a las políticas destinadas a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Desde el punto de vista energético la biomasa es toda la materia orgánica, sea de origen forestal, agrícola, animal e industrias relacionadas, así como también la fracción de residuos biodegradables urbanos, los cuales puedan ser empleados en la producción de energía (Cerdá, 2012). La biomasa es una de las fuentes energéticas renovables con mayor presencia actual y potencial desarrollo, debido a diversos aspectos ligados no solo al ambiente por la

disminución de emisión de gases de efecto invernadero, sino que, además, está relacionada con el desarrollo económico de los países (Cerdá, 2012).

Uno de los usos de la biomasa es la producción de *pellets* ampliamente utilizado en la producción térmica, tanto a nivel residencial como industrial. Es una de las alternativas tecnológicas para el aprovechamiento de la biomasa (residuos), a través de un proceso de densificación; que consiste en la trituración, homogenización y compactación de la madera, utilizando presión, para transformar los residuos en pequeños cilindros de madera denominados *pellets*, los cuales poseen un mejor potencial para generar calor (energía) en relación a los residuos *in natura*, ya que presentan mayor masa por unidad de volumen y más homogénea (Protásio *et al.*, 2013).

El mercado de *pellets*, puede ser dividido en dos segmentos: uso residencial e industrial (incluyendo plantas termoeléctricas). En ambos segmentos los *pellets* compiten con combustibles tradicionales como los derivados del petróleo, gas natural, carbón mineral y vegetal, como también en el caso de la calefacción, con la energía eléctrica. El comercio internacional de *pellets* está creciendo, concentrándose en la EU y también en el Reino Unido (RU), para satisfacer la demanda de energía para calefacción residencial. Autores como Toscano *et al.* (2014) destacan que en Europa para el año 2011 fueron consumidas alrededor de 14,4 millones de toneladas de *pellets*, llevando a la Unión Europea a destacarse como el mayor mercado productor y consumidor de *pellets*. Su uso en la producción de energía eléctrica está concentrado en

países como Suecia, Dinamarca, Holanda y Reino Unido, mientras que, para el uso residencial en Alemania e Italia (Flach *et al.*, 2013). Cabe señalar que la importación de biocombustibles sólidos será vital para equilibrar la demanda de biomasa en las diferentes regiones de Europa, debido a que la oferta interna no crecerá significativamente por las condiciones edafoclimáticas que presenta y a las restricciones de disponibilidad de tierras.

A pesar de la incertidumbre en el flujo de comercio de *pellets* para el 2020 – 2030, es evidente que la UE y RU no son capaces de producir lo suficiente para atender sus demandas. Por esta razón, países como Estados Unidos, Canadá y Brasil se han convertido en grandes exportadores de *pellets* para suplir la gran demanda de esa región. Para regular la calidad de los *pellets* que importa, Europa dispone de un sistema de certificación denominado "ENplus" A1, A2 y B (uso residencial) y ISO18122 (uso industrial), cuyo cumplimiento es obligatorio para el mercado interno e importaciones.

Por otra parte, existe una creciente preocupación de los países importadores de *pellets*, sobre la sostenibilidad de la producción de este biocombustible. Los *pellets* pueden ser de distintas materias primas, pero las restricciones de contenidos de cenizas, azufre, inorgánicos y principalmente el porcentaje de cloro presente en algunas especies (e.g. eucalipto), restringen su uso como fuente de energía. Esto afecta a países productores de biomasa vegetal sólida a base de eucalipto, como Brasil que dispone de una superficie plantada con esta especie de 5.7 millones de hectáreas (Industrias Brasileñas de

Árboles – IBÁ, 2019). Esto a pesar que la biomasa de eucalipto es una de las más apreciada para la producción de *pellets*, debido a sus características físico-químicas (ENplus, 2015). Sin embargo, esta limitación de la biomasa de eucalipto puede ser superada al someterla a algunas modificaciones o tratamientos térmicos (torrefacción), especialmente para reducir el porcentaje de cloro que es el principal obstáculo a superar.

En Sudamérica también se viene promoviendo la biomasa como fuente de energía a través de políticas públicas, con el fin de diversificar la matriz energética utilizando las materias primas con las que cuente cada región. Un ejemplo de esto, es el creciente consumo de *pellets* en Brasil, debido a la disponibilidad de grandes volúmenes de residuos agrícolas y forestales que pueden ser materia prima para la peletización (Pereira, 2014).

En este sentido, Brasil es un país considerado potencia en la región por sus altos niveles de producción de *pellets*. De acuerdo con los datos arrojados por la Asociación Brasileira de Industrias de Pellets (ABIPEL, 2016), para el año 2016 se estimó una producción de 2 millones de toneladas de este material con fines energéticos principalmente, contando con una proyección de 80 millones para el año 2020.

En el contexto energético chileno se viene apostando fuertemente por las energías renovables, ya sea para disminuir la emisión de gases como para construir una matriz energética más equilibrada, y con esto, disminuir la dependencia que existe de los combustibles fósiles. En este contexto, la biomasa

forestal y agrícola ha incrementado su participación en la producción de energía eléctrica y calefacción domiciliaria e industrial a base de *pellets*. A pesar de lo anterior, existe escasa información sobre peletización en Chile que se evidencia en la baja productividad de estudios científicos, ya que la mayoría de estas investigaciones están concentradas en Europa, USA y Brasil.

En Chile la producción de *pellets* se ha incrementado en los últimos años, alcanzando el año 2018 un total de 117.460 ton (Escobar & Weil, 2018), siendo *Pinus radiata* la especie más utilizada por sus características para aglomerarse y color claro que lo hace atractivo para el mercado. Los *pellets* son producidos en plantas que están integradas a centros de aserrío y elaboración de madera utilizando como materia prima viruta y aserrín seco. De acuerdo a esto, la disponibilidad de viruta y aserrín seco es limitada debido a que solo el 9,9% de los aserraderos secan artificialmente su madera (Gysling & Soto, 2016).

Por otra parte, la alta contaminación atmosférica, entre las regiones de O'Higgins y Aysén, por la quema deficiente de leña húmeda, ha llevado al Ministerio del Medio Ambiente a apoyar el recambio de calefactores a leña a calefactores principalmente a *pellets*, por sus bajas emisiones de MP 2,5, llegando el año 2017 a recambiar 5.555 equipos anuales (67% del total del año). A esto se debe agregar la compra privada de calefactores a *pellets*, que se estima anualmente en 8.050 calefactores y 128 calderas residenciales, incrementando la demanda *pellets* en el segmento domiciliario a 24.106 ton año⁻¹ (Escobar & Weil, 2018).

1.2. MATERIA PRIMA COMO FUENTE PARA LA PRODUCCIÓN DE PELLETS

La madera es un tejido resultante del crecimiento primario y secundario de los vegetales superiores, formada por la organización de estructuras anatómicas originadas por la división de las células meristemáticas del cambio vascular y meristemas apicales (Couto *et al.*, 2004). La madera puede ser empleada para diferentes fines, como para la construcción de obras civiles, la producción de celulosa y papel, paneles, entre otros. Así mismo, puede ser utilizada como fuente de energía lo que la ha llevado a considerarla como un importante y diversificado recurso energético debido a las diferentes transformaciones para tal fin. Las características químicas, anatómicas, físicas y mecánicas de la madera presentan diversos niveles de variación. Tales propiedades varían en la madera entre individuos de especies distintas, de la misma especie, de individuos pertenecientes al mismo material genético y varían también en diferentes posiciones internas de un fuste. Dentro de un fuste existen dos tipos básicos de variación: variación longitudinal y radial (Oliveira, 2015), el cual pueden poseer diferentes características y que definen su uso.

Uno de los usos madereros con fines energéticos más significativos son los *pellets*, caracterizados por ser pequeños cilindros de madera compactados y densos. Se obtienen a partir de residuos lignocelulósicos compuestos por tres polímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina) que son de origen vegetal y que corresponden a una fuente energética renovables, de los cuales se tiene un buen potencial para suplir parte de las necesidades mundiales de energía. Estos

residuos generalmente son generados por el proceso productivo de los bosques (Quirino, 2002).

Específicamente en Chile, los bosques cuentan con superficie plantada distribuida en tres especies forestales donde se destacan las siguientes: *Pinus radiata* (60%), *Eucalyptus globulus* (23%) y *E. nitens* (10 %) el resto corresponde a otras especies (INFOR, 2016). En este orden, es pertinente destacar que el sector forestal chileno ha experimentado un importante desarrollo en los últimos años, atribuyéndose este fenómeno a la gran disponibilidad de madera proveniente de plantaciones de rápido crecimiento, principalmente de *Pinus radiata* y de *Eucalyptus sp* (Rojas, 2004). Al respecto, el uso de madera viene aumentando considerablemente, doblando el consumo desde el año 2002 con 25,4 millones de m³ y hasta el año 2018 con 47,854 millones de m³ (INFOR, 2019). Esto genera mayor cantidad de residuos derivados de las plantaciones después de su proceso productivo o de cosecha.

Autor como Calderón (2015) han señalado que, a lo largo de la cadena productiva solamente el 63% del volumen total es efectivamente procesado. Además, estos autores señalan que los subproductos de las actividades de cosecha forestal equivalen en promedio al 40% del total de la biomasa forestal.

Los residuos que se generan después de la cosecha forestal y el procesamiento en la industria de la madera, anteriormente no eran aprovechados o simplemente eran desechados, y en algunos casos eran hasta un problema para las empresas forestales (Nones, 2014). Actualmente, algunas empresas

después de la cosecha, recolectan y posteriormente utilizan al máximo estos residuos forestales (ramas, puntas, raíces y hasta las cortezas), para usarlos como combustible (Foelkel, 2007). De acuerdo con este último autor, las principales características de estos residuos, están relacionados con partes activas en el uso de minerales, los cuales poseen grandes cantidades de lignina y extractivos y a su vez, cuentan con una mayor densidad, lo que las hace una buena opción para energía que posibilitará la posterior transformación en *pellets*.

En Chile, para el año 2010 se generaron 1,56 millones de toneladas de residuos sólidos, siendo este el tercer porcentaje más alto derivado de los residuos agrícolas y forestales, existiendo además una tendencia cada vez mayor, debido a que las plantaciones se incrementan generando así, mayores cantidades de residuos (CONAMA, 2010). En este sentido, la madera como fuente de energía renovable es la más utilizada por los chilenos, representado cerca de 18% de la matriz energética primaria del país. En promedio, en el sector residencial el consumo de leña es de 65% según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO (2012). Porcentaje que va aumentando a medida que nos dirigimos hacia el sur del país, como consecuencia del clima frío lo que se convierte en un factor que incide en un uso mayor de este biocombustible. Sin embargo, el mal uso de la leña (humedad) sumado a artefactos deficientes para su combustión está generando grandes problemas de contaminación ambiental en un importante número de ciudades del sur de Chile. En este contexto y de acuerdo con Fernández *et al.* (2014), el uso

de los *pellets* viene ganando fuerza en el mercado, debido a las características que presenta este biocombustible sólido, que cuenta con un alto poder calorífico y bajo contenido de humedad (menos del 10%), lo que lo hace una alternativa favorable para la utilización en calderas y estufas para calefacción o producción de energía térmica.

Otra fuente de materia prima son las plantaciones dendroenergéticas que son establecidas con el fin de proveer madera en cortos períodos de tiempo (3 – 4 años), para la producción de leña, carbón y a su vez, la elaboración de *pellets*. De acuerdo con Bhattacharya *et al.* (2002), la conversión de residuos o plantaciones dendroenergéticas densificadas poseen las siguientes ventajas: aumenta el poder calorífico líquido por unidad de volumen, mejora las condiciones de transporte y de stock del producto y a su vez, con este proceso se posibilita la resolución a problemas de disposición de residuos y, además, el material combustible producido es uniforme en tamaño y calidad.

Hoy en día, Chile viene trabajando en el tema y en la introducción de nuevas especies con alto potencial para el país. Un ejemplo de esto, son las especies *Paulownia* y *Miscanthus* las cuales son originarias de regiones tropicales y subtropicales de China y Asia, que han sido consideradas como cultivos energéticos de alto potencial, debido a su alta tasa fotosintética y adaptabilidad a diferentes tipos de suelo (Tubeileh *et al.*, 2016). Fueron introducidas en Europa los años 1912 y 1935 respectivamente, cultivadas con fines ornamentales y maderero (Wahid *et al.*, 2015). El mismo autor señala que

desde los años 1980 se han venido investigando el potencial del *Miscanthus* como cultivo energético, y en el caso de la *Paulownia* ya para finales de los años 70, se iniciaron trabajos de mejoramiento genético y de su potencial con fines energéticos y comerciales (Castillo–Martínez *et al.*, 2012).

En Chile se vienen introduciendo ambas especies por medio de ensayos, con el fin observar su potencial y sus adaptabilidades en diferentes tipos de suelos. Es el caso del estudio realizado por Muñoz y Cancino (2014a; 2014b), quienes determinaron que ambas especies poseen un buen desarrollo, gran variación de rendimiento en biomasa y buen potencial energético para la producción de energía. Sin embargo, aún no existen plantaciones de estas especies con fines comerciales o destinados para la producción de energía.

En este sentido, existen varias especies con potencial energético. En este estudio se busca encontrar cuales son las propiedades que afectan la calidad del *pellet*. Para esto, se seleccionaron varias especies madereras y no madereras con el fin de tener un rango amplio de propiedades y analizar cuales tienen mayor o menor relevancia respecto de la calidad del *pellet*. Debido a que *Pinus radiata* es una especie que genera el mejor *pellet* en el mercado, será considerada testigo, y, por lo tanto, se buscará determinar un rango similar o lo más cercano a las características del testigo. De acuerdo a esto, se han seleccionado las especies indicadas en Tabla 1.1 ya que poseen diferentes características y rangos que abarcan los valores establecidos por las normas de calidad de *pellets*.

Tabla 1.1. Rangos de los parámetros importantes que influyen en la calidad del *pellet*

Especies	Lignina %	Extractivos %	PSC kcal kg⁻¹	Cenizas %	Densidad madera kg m⁻³
<i>Paulownia</i>	27 - 34	8 - 10	4219 – 4482	1,0 – 2,2	231 - 282
<i>Miscanthus</i>	26 - 27	3 - 7	3973 - 4333	3,0 – 10	---
<i>E. nitens</i>	18 - 22	1,2 – 1,5	4500 - 4700	0,2 – 0,3	500 - 570
<i>P. radiata</i>	27 - 28	4,2 – 4,6	4700 - 4900	0.3 – 0.7	360 - 410

PCS = poder calorífico superior.

Fuente: García, 2010; Muñoz y Cancino, 2014.

También podemos incluir otro parámetro fundamental como es el cloro, y en especial derivados como las “dioxinas” que son compuestos químicos orgánicos que se derivan de la combustión del cloro y que son consideradas por la Organización Mundial de salud (OMS), como la sustancia más tóxica conocida hoy en día en la ciencia (WHO, 2014). Las biomásas chilenas poseen un mayor porcentaje de este componente debido a que las precipitaciones provienen principalmente de los océanos después de alta evaporación, la cual trae altas concentraciones molares de iones inorgánicos disueltos en las lluvias que tienen hasta un 85% del elemento cloro (Mello, 2001), a diferencia de las biomásas donde se concentra el mercado mundial, que son USA, Canadá, Unión Europea, la precipitación es mayormente proveniente de agua dulce. Por lo tanto, la madera (biomasa) es producidas con bajos porcentajes de cloro y compuestos orgánicos, lo cual se encuadran fácilmente en la norma Enplus o similares para la producción de *pellets* de madera (Holleman-Wiberg's, 1995). Una de las maneras de disminuir el cloro en la madera, aprovechando su alta solubilidad, es

su lavado que permite reducir el porcentaje de este componente y así cumplir con las normas internacionales.

1.3. TRANSFORMACIÓN Y PELETIZACIÓN DE LA BIOMASA

Existen diferentes tipos de transformaciones de la biomasa, se tiene las rutas bioquímicas (fermentación y digestión) las cuales son para la producción de etanol y biodiesel y la segunda ruta (la más utilizada) es la termoquímica (combustión, gasificación pirolisis y licuefacción).

No existe un único método de transformación que cambie la biomasa en un biocombustible competente para ser utilizado, debido a que se tienen que combinar varios tratamientos como la molienda, el secado, reducción granulométrica y en el caso de los *pellets* la densificación. Cabe hacer notar que, al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente. La combustión de los *pellets* es más interesante ambientalmente, debido a que reduce las emisiones de CO₂, principal causante del efecto invernadero, también otros gases como: óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) (Couto *et al.*, 2012).

El proceso o tecnología de peletización consiste en transformar la biomasa en pequeños cilindros, compactos listos para ser quemados en hornos, calderas, estufas o cocinas. La compactación de la peletizadora, ocurre por medio de la

extrusión de la biomasa en una matriz perforada de acero, donde los orificios varían entre 6 - 12mm de diámetros normalmente, y una presión interna de los cilindros que ayuda a forzar el material por los orificios con una presión entorno de 300 MPa y temperatura aproximada de 100°C (Nielsen *et al.*, 2009).

El proceso de conversión de los residuos forestales en formas densificadas, poseen las siguientes ventajas: aumenta la densidad a granel, aumenta el poder calorífico líquido por unidad de volumen, mejora las condiciones de transporte y almacenamiento del producto, se minimiza problemas de disposición de residuos, el material producido es un combustible uniforme en tamaño y calidad, también este proceso disminuye el uso de especies nativas, ya que es un producto que puede ser elaborado de los residuos de plantaciones forestales (Tumuluru *et al.*, 2011).

De acuerdo con Días (2002) la combustión de este material leñoso densificado no es un proceso nuevo, simplemente era poco utilizado y su caracterización aún no está completamente desarrollada, pero año a año Europa ha venido utilizando este biocombustible y en la última década la demanda va en aumento. Algunas de las ventajas de este combustible densificado, es que se tiene una combustión más uniforme y una reducción de la emisión de partículas durante su quema. Además, se pueden mejorar algunas propiedades a través de un tratamiento térmico (torrefacción) que a diferencia de la pirólisis convencional, en la torrefacción el rendimiento en masa es superior y también se reducen los componentes indeseables o de bajo valor energético. Las propiedades del

material torrefactado varían principalmente en función de las propiedades iniciales de la madera, de la velocidad de calentamiento, del tiempo y de la temperatura final del proceso (Rodrigues & Rousset, 2009).

Así se tiene un biocombustible de mayor densidad energética y mejores propiedades de calidad. Varios autores justifican que, a pesar de la degradación parcial de la estructura fibrosa, disminuyendo el rendimiento gravimétrico y la resistencia del material, los beneficios son mayores.

1.4. PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PELLETS

Las propiedades de los *pellets* pueden variar considerablemente, los factores como materia-prima, humedad, temperatura y presión son determinantes para tener una buena calidad. Una de ellas es la durabilidad, que tiene importancia para el consumidor, ya que *pellets* con baja durabilidad son sensibles a tensiones mecánicas durante el transporte y manipulación, lo que resulta en las formaciones de finos y dificulta el uso del producto. Este parámetro también se ve influenciado principalmente por el contenido de lignina, parámetro importante que ayuda en la ligación de las partículas. Otra propiedad determinante es la humedad de la materia-prima, debido a que altos contenidos de humedad dificultan la compactación y los *pellets* formados pueden ser friables o quebradizos (García, 2010).

De acuerdo con Días (2002), la humedad de los *pellets* puede variar de 5 a 10%. Esta afecta significativamente el poder calorífico que generalmente varía

entre 4,7 y 5,0 MW h⁻¹ por tonelada de *pellets*. Los *pellets* poseen dimensiones entre 3,15 a 25mm de diámetros y longitudes de 5 a 40mm. Cuando el diámetro es mayor que 25mm el producto es considerado como briqueta. Los diámetros más comunes en Europa, varían de 4 a 10mm resultando un producto más homogéneo y de fácil manipulación (Oliveira, 2015).

Para evaluar la variabilidad de las propiedades de los *pellets* existen una serie de normas de calidad (Tabla 1.2) que permiten su clasificación. En el caso de Chile existe la norma nacional NCh-ISO 17225/2, pero que aún no son de carácter obligatorio, por lo tanto, se utilizan las normas alemanas. Específicamente para este trabajo, se empleará la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 14961-2 (2011b), la cual es utilizada para *pellets* producidos con especies maderables como el eucalipto, pino, acacia entre otros y la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 14961-6 (2012a) que abordan la calidad de los *pellets* no maderables (herbáceas), como es el caso de *Miscanthus*, para uso energético.

Tabla 1.2. Parámetros de calidad para *pellets* establecidos por las normas alemanas DIN.

Parámetros de calidad originados de biomásas maderables DIN EN 14961-2			
Propiedad	Categoría (Clasificación en cuanto al origen)		
	A1	A2	B
Diámetro (mm)	6 ± 1	6 ± 1	6 ± 1
Longitud (mm)	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40
Humedad base húmeda (%)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Humedad base seca (%)	≤ 11,1	≤ 11,1	≤ 11,1
Cenizas (%)	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,0
Durabilidad mecánica (%)	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 96,5

Finos (%)	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
PCL (kcal kg⁻¹)	3.947 ≤ PCL ≤ 4.545	3.900 ≤ PCL	3.828 ≤ PCL ≤ 4.545
Densidad a granel (kg m⁻³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600
N (%)	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
S (%)	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,04
Cl (%)	< 0,02	< 0,02	< 0,03
Parámetros de calidad originados de biomásas no maderables DIN EN 14961-6			
Propiedad	Categoría (Clasificación en cuanto al origen)		
	A	B	
Diámetro (mm)	6 ± 1	6 ± 1	
Longitud (mm)	3,15 ≤ L ≤ 40	3,15 ≤ L ≤ 40	
Humedad base húmeda (%)	≤ 12	≤ 15	
Humedad base seca (%)	≤ 13,6	≤ 17,6	
Cenizas (%)	≤ 5	≤ 10	
Durabilidad mecánica (%)	≥ 97,5	≥ 96,0	
Finos (%)	≤ 2,0	≤ 3,0	
PCL (kcal kg⁻¹)	≥ 3.373	≥ 3.158	
Densidad a granel (kg m⁻³)	≥ 600	≥ 600	
N (%)	≤ 1,5	≤ 2,0	
S (%)	≤ 0,20	≤ 0,20	
Cl (%)	< 0,20	< 0,30	

Basado en los antecedentes presentados anteriormente y debido al incremento de la demanda y la limitada oferta de *pellets*, debido a limitaciones de abastecimiento de materia prima, hacen necesario estudiar otras fuentes de materia prima, biomásas leñosas y no leñosas, como lo son *Paulownia elongata x fortunei*, *Miscanthus x giganteus*, *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata* obtenido desde intervenciones silvícolas. La relevancia de esta investigación se enfoca en superar el vacío teórico existente en Chile sobre el uso de este tipo de biomasa para *pellets* y, a su vez, sirva como base o incentivo para próximos estudios.

1.5. HIPÓTESIS

En esta investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

1. La densidad de la biomasa, morfología, la cantidad y distribución de lignina influyen la durabilidad de los *pellets* producidos desde *Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus* y *Pinus*, donde las especies con mayor densidad y cantidad de lignina presentaran mejor calidad de *pellets*.
2. Independiente de las características de cada especie, el tratamiento térmico de torrefacción mejora las propiedades energéticas y disminuye el porcentaje de cloro en los *pellets* producidos desde *Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus* y *Pinus*.



1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Evaluar el efecto de las propiedades de cuatro especies con potencial energético para la fabricación de *pellets* de calidad para uso en la producción de energía térmica.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la especie y sitio en las propiedades energéticas de biomasa producida con fines energéticos.
- Aplicar técnicas de microscopía electrónica (SEM y CLSM) para evaluar cambios en la cantidad y distribución de lignina de la biomasa y su efecto en las propiedades que influyen la calidad de los *pellets*.
- Evaluar los efectos de diferentes temperatura y tiempos de torrefactado sobre las propiedades físicas-químicas y energéticas de *pellets* de especies con potencial energético.

CAPITULO II. POTENCIAL ENERGÉTICO DE CLONES DE *Paulownia* Y *Miscanthus* PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CHILE.¹

RESUMEN

El modelo energético mundial se basa en combustibles fósiles, el cual ha venido siendo sustituido por consideraciones ambientales y económicas, dándole paso a la biomasa y a las plantaciones dendroenergéticas. En Chile, las energías renovables no convencionales (ERNC) vienen ganando espacio, además la nación ha abocado esfuerzos en especies que posean buen potencial energético. Así, este estudio tiene como objetivo evaluar el potencial físico-químico, energético y perfiles térmicos de dos especies (*Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*) para el uso energético en tres sitios contrastantes de Chile. Los análisis fueron realizados en su mayoría bajo los estándares de la Norma DIN. Los resultados para *Paulownia* mostraron diferencias entre los sitios, obteniendo los mejores resultados en el sitio El Vergel con un porcentaje de lignina de 34,84%, cenizas de 1,16%, material volátil de 81,70%, carbono de 47,02% y una densidad energética líquida (DEL) de 2,16 GJ m⁻³. Para *Miscanthus* los mejores resultados también fueron registrados en El Vergel, con porcentaje de lignina de 30,60%, cenizas de 2,84%, material volátil de 82,26% y carbono de 45,97% y una DEL de 1,67 GJ m⁻³, destacando que los mejores

¹Pegoretti H, Muñoz F, Teixeira R, Sáez K, Segura C, Olave R. (2020) Potencial energético de clones de *Paulownia* y *Miscanthus* para la producción de energía en Chile. *Madera y Bosques*, 26(1).

resultados de El Vergel son para la densidad D1. Respecto al perfil térmico (TGA-DTG), la *Paulownia* presentó pérdida de masa mayor que el *Miscanthus* y tuvo ignición a menor temperatura de 197,76 °C y 209,66 °C respectivamente. Por lo tanto, el mayor porcentaje de residuo lo presentó el *Miscanthus* con 5,63%.

Palabras clave: análisis térmico, bioenergía, biomasa alternativa, energía renovable, ignición, TGA

1.7. INTRODUCCIÓN

En Chile la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables aporta alrededor del 11,74% a la matriz energética total (Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables [CIFES], 2016). El Estado de Chile se ha venido planteando el desafío de promover el incremento de este tipo de energía, a través del desarrollo de estrategias enmarcadas en la reducción de emisiones provenientes de combustibles fósiles, comprometiéndose de esta forma con el incremento de las energías renovables y el fomento a la biomasa forestal con fines energéticos (Tolosana, 2009). Todo esto con el objetivo de fomentar soluciones dirigidas a impulsar la bioenergía en la matriz energética nacional. En este sentido, una de las alternativas para aumentar la producción de energía renovable es incentivar el establecimiento de cultivos dendroenergéticos, que posibiliten la producción y utilización de biomasa, así

como también, la creación de oportunidades para reducir el abandono gradual de cultivos tradicionales.

Una especie que posee excelentes características y que además se muestra favorable para la producción de biomasa, es *Miscanthus x giganteus* J. M. Greef & Deuter ex Hodk. & Renvoize., la cual es una hierba perenne C4 que se caracteriza por una alta absorción de CO₂, alto potencial de rendimiento y bajo consumo de agua (Płazek & Dubert, 2010). También ha sido ampliamente cultivada como fuente de bioenergía por más de 30 años (Scally, Hodkinson & Jones, 2007).

Asimismo, *Miscanthus x giganteus* tiene buena capacidad de adaptación a diferentes condiciones de suelo, es decir, desde arena a suelos de arcilla con alto contenido de materia orgánica, como también en suelos pobres. El-Bassam (1996) señala que los mejores rendimientos se muestran en suelos profundos, con alto contenido de materia orgánica, alta capacidad de retención de agua y buen drenaje. Otro estudio realizado en la zona centro sur de Chile reveló que en sectores costeros de suelos de textura franco-arcillosa-limosa con capacidad de retención de humedad, se obtuvo mejor rendimiento en biomasa (Muñoz & Cancino, 2014a).

La especie *Miscanthus sp* ha adquirido gran relevancia en el sector productivo, especialmente en Europa. Se ha demostrado que la biomasa de *Miscanthus x giganteus* puede ser utilizada como fuente de combustible sólido, así como también en la fabricación de materiales de construcción y como fuente

de celulosa (Lewandowski *et al.*, 2000). Sin embargo, su principal uso es la producción de energía, siendo considerada una excelente especie para estos fines.

Otra especie de interés para la generación de energía es *Paulownia sp* también conocidas como kiri. Considerado como el árbol del futuro se han venido expandiendo su cultivo con fines maderables y energéticos. Posee tolerancia a diferentes condiciones de suelo y clima (Wang & Shogren, 1992), incluyendo amplios rangos de temperatura y precipitación, inclusive presenta un buen desempeño en suelos pobres (Kasamaki, 2007).

Además, el género posee una alta capacidad de crecimiento en ciclos cortos de producción, generando alta cantidad de biomasa para energía (López *et al.*, 2012). Todas las especies y clones de este género son similares en apariencia y propiedades de la madera. Sin embargo, el clon *Paulownia eloganta x fortunei* se diferencia por corresponder a un híbrido natural que combina en su genotipo las características de dos especies destacadas por su crecimiento, adaptabilidad a diferentes tipos de sitios, resistencia a la sequía y a las bajas temperaturas, ideal para el uso energético (Hua *et al.*, 1986).

Por otro lado, la generación de energía a partir de la biomasa lignocelulósica promueve la descomposición térmica de los componentes químicos de la biomasa, la cual puede ocurrir mediante un proceso de carbonización sobre atmósfera inerte o en una atmósfera oxidante. Las fracciones de los componentes de las biomásas tiene una cinética de

descomposición térmica bien diferenciada, por lo tanto, es bien conocido que las hemicelulosas sufren los mayores vértices de degradación entre 200 °C – 300 °C, la celulosa entre 240 °C – 350 °C y la lignina oscila entre 350 °C – 500 °C. Por lo tanto, es necesario evaluar el perfil térmico mediante técnicas que faciliten la comprensión del proceso. En este contexto, el análisis termogravimétrico (TGA) puede ser utilizado para determinar reacciones de descomposición y análisis de estabilidad térmica (Zattera *et al.*, 2005). Este método nos permite determinar la degradación térmica de la biomasa, observándose cuándo inicia y dónde es más acentuada, también nos suministra el porcentaje de residuos que se produce a una temperatura determinada. Por esta razón es una herramienta relevante a la hora de seleccionar especies para fines energéticos.

Estos aspectos se han convertido en factores importantes para decisiones de establecimiento de este tipo de cultivos en el territorio nacional. Un ejemplo de esto, han sido los estudios desarrollados en la región de Antofagasta durante el año 2010, con el objetivo de establecer ensayos para obtener biomasa para energía (Muñoz & Cancino, 2014b).

Una investigación de Fernández-Puratich *et al.* (2014), muestra el porcentaje de biomasa de *Paulownia* de 13,9 t ha⁻¹ y 15,3 t ha⁻¹, que es relativamente alta, a pesar que su fuste es hueco en su sección medular. También posee alto poder calorífico que oscila entre 16 MJ kg⁻¹ – 19 MJ kg⁻¹, siendo en ocasiones mejor que algunas especies forestales que son utilizadas en la producción de bioenergía. *Miscanthus* es una especie bastante utilizada

generalmente para la producción de etanol en la mayoría de los países, dando resultados positivos; por ejemplo un caso registrado por la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA, (2012)), demuestra que el *Miscanthus*, a pesar que rinde menos en megagramos por hectárea, su producción de etanol es mayor que otras especies oscilando entre 10000 L ha⁻¹ – 12000 L ha⁻¹ utilizadas para este fin como es el caso de maíz y caña de azúcar principalmente.

A diferencia de otros países pertenecientes a la región europea, en Chile no ha habido experiencia en la producción de biomasa para fines de uso energético con ambas especies mencionadas, y a su vez, existe escasa evidencia científica hasta el momento que permita sustentar el futuro establecimiento masivo de plantaciones productivas dirigidas a fines energéticos (Fernández-Puratich *et al.*, 2014; Muñoz *et al.*, 2018). Por lo tanto, la presente investigación consistió en evaluar las características físicas, químicas y energéticas de clones de *Miscanthus x giganteus* y *Paulownia eloganta x fortunei* establecidos en tres suelos contrastantes del centro sur de Chile a través de los siguientes objetivos.

1.8. OBJETIVOS

El objetivo principal fue evaluar el potencial energético de clones de *Paulownia* y *Miscanthus* en tres sitios contrastantes y como objetivos específicos: a) determinar las características físico-químicas de las especies; b) evaluar las

propiedades energéticas para la producción de estas especies con fines energéticos; c) analizar la degradación térmica de las biomásas y finalmente d) determinar el mejor sitio para el plantío de ambas especies.

1.9. MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1. Biomasa

Para evaluar su potencial se establecieron ensayos dendroenergéticos con *Miscanthus x giganteus* y *Paulownia elongata x fortunei*, en tres sitios contrastantes de la zona centro sur de Chile (Muñoz & Cancino, 2014b). Con este estudio se dio paso al desarrollo de nuevas oportunidades de producción de biomasa que aporten a la matriz energética del país.

El material (clones) utilizado proviene de un proyecto que se llevó a cabo entre los años 2010 y 2014. Se establecieron en tres localidades, el primero fue el fundo El Vergel (Chaimávida, Concepción). El segundo sitio corresponde al fundo La Isla (Quillón) de típico clima mediterráneo templado cálido. Su morfología es ondulada a plana, se caracteriza por tener suelos derivados de rocas metamórficas. Por lo tanto, posee bajo porcentaje de fósforo, nitrógeno y materia orgánica, lo cual dificulta el establecimiento de cultivos agrícolas mas no de la acción forestal. Por último, el tercer sitio corresponde al fundo Trehualemu (a 13 kilómetros de Buchupureo), ubicado en la Región del Maule, pertenece a la franja costera ubicada entre la vertiente occidental de la costa y el Océano

Pacífico. La ubicación e información edafoclimática de los tres sitios está ilustrada en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ubicación de los ensayos de *Paulonia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*

Sitio	Coordenadas	Precipitación media anual	Clima	Suelo
Trehualemu Región VII	Latitud sur: 35°58'29" Longitud este: 72°45'8"	890 mm	Agroclimática secano costero	Franco arcillo limosa (suelos profundos)
El Vergel Región VIII	Latitud sur: 36°50'30" Longitud oeste: 72°54'26"	1200 mm	Agroclimática secano costero	Franco arcillo limosa (moderadamente profundos)
La Isla Región VIII	Latitud sur: 36°44'12" Longitud este: 72°26'49"	1000 mm	Vertiente occidental de la Cordillera de la Costa	Franco arcillo arenosa (suelos con pendientes de 0-3%)

El material de *Miscanthus* proviene de dos densidades (D1 = 20000 brotes ha⁻¹; D2 = 40000 brotes ha⁻¹) recolectados en los tres sitios (Tabla 2.1), la biomasa, obtenida de plantíos de un año de edad, fue triturada y homogenizada por completo (caña, ramas y hojas), posteriormente fue tamizada entre las mallas 40 y 60, utilizando el material retenido en 60 para los análisis y el restante fue considerado como polvo (utilizado para TGA). Por lo tanto, se obtuvo una muestra compuesta (mezcla) en cada sitio y para cada densidad, para así determinar sus características físico-químicas y energéticas.

Para *Paulownia*, el material recolectado, de plantíos de dos años de edad, proviene de una sola densidad (D0 = 1000 arb ha⁻¹) plantada en las mismas tres

localidades. Se realizó el mismo procedimiento que el *Miscanthus*, salvo que se utilizó solamente el fuste para esta especie. El experimento consistió en 15 tratamientos con tres repeticiones para cada parámetro evaluado. Los diferentes tratamientos de las biomásas estudiadas están ilustrados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tratamientos, especies y origen de las especies utilizadas en el estudio

Trat.	Especie	Sitio	Clon	ID	Densidad de plantío
T1	<i>Paulownia</i>	La Isla	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T2	<i>Paulownia</i>	La Isla	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T3	<i>Paulownia</i>	La Isla	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T4	<i>Paulownia</i>	Trehualemú	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T5	<i>Paulownia</i>	Trehualemú	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T6	<i>Paulownia</i>	Trehualemú	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T7	<i>Paulownia</i>	El Vergel	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T8	<i>Paulownia</i>	El Vergel	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T9	<i>Paulownia</i>	El Vergel	P1	D0	1.000 arb ha ⁻¹
T10	<i>Miscanthus</i>	Trehualemú	MP1	D1	20.000 brotes ha ⁻¹
T11	<i>Miscanthus</i>	Trehualemú	MP2	D2	40.000 brotes ha ⁻¹
T12	<i>Miscanthus</i>	La Isla	MP1	D1	20.000 brotes ha ⁻¹
T13	<i>Miscanthus</i>	La Isla	MP2	D2	40.000 brotes ha ⁻¹
T14	<i>Miscanthus</i>	El Vergel	MP1	D1	20.000 brotes ha ⁻¹
T15	<i>Miscanthus</i>	El Vergel	MP2	D2	40.000 brotes ha ⁻¹

Trat. = tratamiento.

2.3.2. Caracterización física, química y energética de la biomasa

La humedad (base seca) de la biomasa se obtuvo a través de la metodología descrita por la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 14774-1 (2010a). La densidad a granel fue realizada de acuerdo con la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 15103 (2010c). Para la determinación de la composición química y el poder calorífico superior de las muestras, se utilizaron muestras molidas en un molino de laboratorio tipo Wiley, de acuerdo

con la norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI) T 257 cm-85 (1985).

La caracterización de la composición química de la biomasa consideró el contenido de extractivos utilizando la norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI) T 204 cm-97 (1997), utilizando el método de extractivos totales, el cual fue realizado con acetona 90%. El contenido de lignina fue realizado por hidrólisis ácida de acuerdo con Mendonça *et al.* (2008).

La determinación de la química inmediata de la biomasa, material volátil, cenizas y por diferencia el carbono fijo, fue mediante el procedimiento establecido de la norma *American Society for Testing Materials* (ASTM) D1762-84 (2007). La composición de química elemental (carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre) fue determinada en un equipo Vario Micro Cube CHNS-O, Elementar® y fue realizada de acuerdo con la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 15104 (2011c). El valor de oxígeno fue determinado por la sumatoria del carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y el contenido de cenizas decrecido de 100, de acuerdo con la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 15296 (2011e).

Para determinar el poder calorífico superior (PCS), se utilizó una bomba calorimétrica modelo PARR 6400 mediante el procedimiento de la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 14918 (2010b). El poder calorífico inferior (PCI) fue estimado mediante la fórmula (2.1); donde ambos son calculados en kcal kg⁻¹ y H es el contenido de hidrógeno (% en base seca), de acuerdo con (Brand, 2010).

$$PCI=PCS-(600 \times 9H) / 100 \quad (2.1)$$

La estimación del poder calorífico líquido o útil (PCL), fue realizada utilizando la fórmula (2.2); conforme al anexo E de la norma *Deutsches Institut Für Normung* (DIN) EN 14918 (2010b).

$$PCL=PCI \times \left[\left(\frac{100-U_{bu}}{100} \right) \right] - (6 \times U_{bu}) \quad (2.2)$$

Donde U_{bu} se refiere a la humedad base húmeda.

De esta forma fue posible calcular la densidad energética a granel de las biomasas, mediante la fórmula (2.3);

$$DE_G=DG \times PCL \quad (2.3)$$

Donde DE_G es densidad energética a granel y DG se refiere a densidad a granel.

1.10. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

En este trabajo se analizó la reactividad mediante el criterio termogravimétrico por temperatura. 1) La temperatura de base (T_{base}) o temperatura de ignición, la cual es el punto donde se obtiene un valor de la derivada $DTG=1$ (%mas min^{-1}); donde las muestras más reactivas corresponderán a las que alcanzan el valor base (DTG) a menores temperaturas

(T_{base}) y menor tiempo, esto se debe a la liberación de los volátiles más fácilmente (Ghetti, 1986). 2) La temperatura en la que se da la máxima tasa de pérdida de masa durante la etapa de volatilización (T_{max}). Esta variable se considera para verificar si existe una relación entre análisis próximo y el análisis térmico de las muestras.

Para el análisis de termogravimétrico (TGA), se utilizaron muestras de biomasa seca y molidas (5mg) por triplicado empleando un equipo TGA/DSC1 (*Mettler Toledo, Switzerland*), llegando a una temperatura de 600 °C en atmósfera de aire con una velocidad de aumento de temperatura de 20 °C min⁻¹ para evaluar la pérdida máxima de peso.

1.11. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Para cada propiedad cuantificada de las especies, fueron calculadas las tendencias centrales de media y dispersión (desviación estándar). Para evaluar si existen diferencias estadísticas significativas entre los sitios o entre densidades se realizó un análisis de delineamiento enteramente casualizado (DIC), luego se aplicó una comparación de medias a través del test Tukey con 5% de probabilidad. Se empleó el software estadístico SPSS (versión 24.0). Posteriormente se realizó un análisis multivariado de componentes principales (PCA), para así reducir la dimensión del conjunto de datos, conservando la variación de datos. El cual nos permitió verificar la influencia de cada variable y su correlación.

1.12. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.6.1. Características físicas, químicas y energéticas de *Paulownia elongata x fortunei*

Los resultados obtenidos de la caracterización química inmediata (lignina, extractivos, cenizas, carbono fijo y volátiles), química elemental (CHNS-O) y los poderes caloríficos (PCI, PCS, PCL y DEL) de *Paulownia elongata x fortunei* son ilustrados en la tabla 2.3, los valores muestran las comparaciones entre sitios. La lignina es un componente importante y deseable para el área energética, ya que contribuye al aumento de los poderes caloríficos de las biomásas (Demirbas, 2002). Los resultados obtenidos arrojaron un promedio de lignina de 34,41%, destacando que estos valores son similares a los encontrados por Muñoz y Cancino (2014b), aunque mayores a los valores de lignina reportado por Kalaycioglu *et al.* (2005). Esto nos indica que es factible plantar la especie en los tres sitios para fines energéticos (valores encontrados favorables), ya que es de conocimiento que el sitio puede afectar la composición química debido a las propiedades o nutrientes existentes en cada lugar.

Por otra parte, respecto a los extractivos, autores como Vargas-Moreno *et al.* (2012), definen que estos desempeñan un papel importante en el uso de las biomásas como fuente de energía, y además contribuyen a elevar el poder calorífico de las biomásas junto con la lignina. En este sentido, en el presente estudio se observó una media de extractivos de 9,29%, donde no hubo diferencia significativa entre los sitios, estos valores también son similares a los

encontrados por Muñoz y Cancino (2014b). Componentes como la lignina y los extractivos son parámetros importantes en la parte energética, ya que bajos porcentajes en ambas cuantificaciones podría ser un factor para descartar una especie en la producción de bioenergía, debido a que disminuiría el poder calorífico.

Respecto a las variaciones del carbono fijo, que es la cantidad de carbono retenida en la biomasa después de perder todas las sustancias que volatizaron en el proceso y que no es ceniza, pueden ser explicadas por las diferencias de los porcentajes de lignina y extractivos, ya que, a mayor cantidad de lignina mayor porcentaje de carbono fijo (Demirbaş, 2003). Referente a lo anterior, la media obtenida en este estudio para este parámetro fue de 18,29%, y no se presentaron diferencias significativas entre sitios. Esto señala que combustibles que posean mayores valores de carbono fijo se quemarán o consumirán más lentamente, ya que es una fracción no volátil que se oxida en el estado sólido. Estos valores obtenidos son superiores al ser comparados con el estudio realizado por Pinto (2015), con *Paulownia tomentosa* y *Paulownia elongata x fortunei*, donde la media fue de 13,26%. De acuerdo con (Poddar *et al.*, 2014), los materiales volátiles contribuyen a la ignición del combustible. En este estudio se obtuvo una media de 80,38% y no presentó diferencias significativas entre sitios. Este porcentaje resultó bajo respecto a valores hallados por Guofeng (2014), quien registró volátiles de *P. tomentosa* y *P. elongata* de 85,03% y 81,68%

respectivamente. Esto sería una desventaja, ya que altos valores de materiales volátiles son favorables para la ignición y el uso energético.

Tabla 2.3. Resultados de la caracterización de la *Paulownia elongata x fortunei*

Variable	La Isla		Trehualemu		Vergel		R2	Valor-p
	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.		
Lignina (%)	32,98 ^b	1,96	35,42 ^a	1,563	34,84 ^{ab}	1,58	0,35	0,266
Extraíbles (%)	8,86 ^a	1,37	9,14 ^a	0,709	9,85 ^a	2,17	0,09	0,732
Cenizas (%)	1,19 ^b	0,41	1,62 ^a	0,079	1,16 ^b	0,03	0,52	0,106
Carbono fijo (%)	18,63 ^a	1,85	19,24 ^a	1,785	17,18 ^a	0,13	0,33	0,290
Volátiles (%)	80,20 ^{ab}	1,67	79,21 ^b	1,898	81,62 ^a	0,14	0,40	0,208
Carbono (%)	45,44 ^{ab}	0,49	45,12 ^b	1,053	46,84 ^a	1,44	0,42	0,193
Hidrogeno (%)	6,11 ^a	0,19	6,36 ^a	0,133	6,49 ^a	0,26	0,47	0,148
Nitrógeno (%)	1,12 ^a	0,09	1,16 ^a	0,299	0,95 ^a	0,05	0,28	0,372
Azufre (%)	0,32 ^a	0,05	0,20 ^b	0,058	0,27 ^{ab}	0,01	0,65	0,041
Oxígeno (%)	45,59 ^a	0,61	45,69 ^a	1,433	44,09 ^a	1,94	0,27	0,373
H. (base seca) (%)	6,16 ^b	0,15	6,72 ^a	0,21	6,59 ^{ab}	0,31	0,34	0,455
D. granel (kg m ⁻³)	170,52 ^a	0,18	124,52 ^a	0,46	144,25 ^a	0,32	0,75	0,421
PCI (MJ kg ⁻¹)	16,35 ^a	0,17	16,15 ^{ab}	0,071	16,08 ^b	0,15	0,49	0,125
PCS (MJ kg ⁻¹)	17,70 ^a	0,17	17,51 ^{ab}	0,071	17,44 ^a	0,15	0,49	0,125
PCL (MJ kg ⁻¹)	15,35 ^a	0,57	14,98 ^{ab}	0,210	14,93 ^b	0,21	0,26	0,389
DEL (GJ m ⁻³)	2,62 ^a	0,18	1,86 ^c	0,020	2,15 ^b	0,03	0,92	0,000

D.E. = desviación estándar; H. (base seca) = Humedad base seca; D. granel = densidad a granel; PCI = poder calorífico inferior; PCS = poder calorífico superior; PCL = poder calorífico líquido; DEL = densidad energética líquida; Medias iguales por la misma letra no difieren entre sí, a 1% de probabilidad por el test Tukey.

Por otra parte, la química elemental (carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno) de la biomasa en la producción de bioenergía es relevante. Es deseable que la biomasa presente altos contenidos de carbono e hidrógeno y bajos valores de oxígeno y cenizas (Paula *et al.*, 2011), para tener un mejor rendimiento y aprovechamiento del combustible. En la tabla 2.3 se ilustran los resultados de la química elemental, donde se observa que la media del carbono e hidrógeno es de 45,88% y 6,35%, respectivamente, estos valores son similares

a los encontrados por Fernández-Puratich *et al.* (2014). También obtener alto porcentaje de carbono e hidrógeno es importante, ya que contribuyen con un mayor equilibrio en la liberación de energía y en la formación de CO₂ y H₂O (Oberberger & Thek, 2010). Respecto al nitrógeno en los tres sitios evaluados se registraron valores con media de 1,04%, es decir, el doble de lo que se puede encontrar en la literatura (alrededor de 0,5%) (Oberberger *et al.*, 2006). De acuerdo con los mismos autores, porcentajes superiores a 0,6% causan impactos negativos al ambiente debido a la liberación de óxidos nítricos durante la combustión.

Por otra parte, valores de azufre superiores a 0,1% están relacionados a corrosión de los equipos (estufas) utilizadas para la combustión de la biomasa, esto es debido a la formación de sales alcalinas (Oberberger *et al.*, 2006). Entre los tres sitios evaluados, La Isla presentó el mayor valor de azufre entre los sitios, registrando una media de 0,25%. Este valor es alto respecto al hallado por Fernández-Puratich *et al.* (2014), quienes registraron un valor de azufre de 0,03% en *Paulownia spp.* Estos altos valores de azufre registrados en los sitios se deben al efecto aerosol del mar que es una fuente importante de azufre; por lo tanto, sitios ubicados cerca del litoral costero pueden recibir importante aporte de este elemento. Por otro lado, el oxígeno también es un inconveniente ya que elevados porcentajes de nitrógeno y oxígeno resultan en una disminución del valor calórico de la biomasa (Velázquez-martí *et al.*, 2014), así que los valores de este estudio (40% - 48%) están dentro de los parámetros normales.

Los mayores valores energéticos provienen de biomásas que presenten altos porcentajes de lignina, mayor cantidad de resinas y aceites esenciales. Según Gillespie *et al.* (2013), señalan que el poder calorífico líquido PCL (o útil) y la densidad energética líquida DEL son parámetros importantes para poder caracterizar un material como combustible, ya que optimiza la cantidad de biomasa en la producción de energía, ayuda la parte logística y también se obtienen ideas para dimensionar las instalaciones donde será almacenado el material. Al respecto, en este estudio se observó que los poderes caloríficos (Tabla 2.3) de los tres sitios son similares a los estudios de Fernández-Puratich *et al.* (2014). Se observó que, en La Isla, la DEL fue mayor, esto se puede explicar debido a que también presentó el menor porcentaje de humedad, el cual favoreció a la DEL, caso contrario a lo sucedido en el sitio de Trehualemú. Por lo tanto, es posible determinar que la especie *Paulownia elongata x fortunei* se adaptó a los sitios evaluados, donde el conjunto de parámetros estudiados evidenció mejores resultados específicamente en el sitio descrito como el Vergel.

2.6.2. Características físicas, químicas y energéticas de *Miscanthus x giganteus*

Es importante destacar, que las características de cada sitio pueden modificar ciertas propiedades del *Miscanthus*. Una de las variables importantes es la disponibilidad de agua que puede llegar a influenciar tanto el rendimiento (Roncucci *et al.*, 2015), como también los parámetros químicos y energéticos.

Por lo tanto, tener conocimiento sobre la especie y el sitio es esencial a la hora del establecimiento de cualquier cultivo y más con fines energéticos.

Se evaluó el desempeño del *Miscanthus x giganteus* plantados en los tres sitios ilustrados en la tabla 2.4, además se verificó la comparación de ambas densidades (D1-D2) en el mismo sitio como también entre los tres sitios. Se encontró 36,14% de lignina en la D2 de La Isla (significativamente diferente a la densidad D1); esto demuestra el potencial de este sitio para el establecimiento de plantíos energéticos. Estos valores resultaron superiores a los obtenidos por (Muñoz & Cancino, 2014a), e inclusive superior a una especie de gramínea muy similar al *Miscanthus* y altamente utilizada con fines energético en Brasil como es el Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), el cual posee porcentajes de lignina de 23% – 25% (Pereira, 2014). En este sentido, al establecer comparaciones de cada densidad entre los tres sitios referente, es posible notar que la D2 de La Isla continuó destacándose sobre los demás sitios evaluados, aunque sólo con diferencias significativas con la densidad D2 del sitio Trehualemu.

El porcentaje de extractivos obtenidos en el sitio Trehualemu fue superior a los otros sitios con una media de 6,51%, presentando diferencia significativa entre los sitios (Tabla 2.4.). A su vez, los valores medios de extractivos de El Vergel son similares a los encontrados por Rosa *et al.* (2004), en un estudio realizado en *Miscanthus sinensis*.

Referente al porcentaje de cenizas, cuando se comparan ambas densidades en el mismo sitio, presentan diferencias significativas entre ambas densidades. Los valores hallados en el estudio son superiores a los encontrados por Lino *et al.* (2014), donde se registró 1,90% de cenizas en *Miscanthus x giganteus*. Por el contrario, en este estudio los valores para este parámetro son similares a resultados encontrados por el mismo autor en *Miscanthus sinensis* y *Miscanthus floridulus* con 4,36% y 4,34% respectivamente. Cuando comparamos ambas densidades entre los tres sitios sobre dicho parámetro, podemos observar que la D1 es estadísticamente diferente entre sitios. De igual forma los valores de este parámetro se encuadran dentro de los exigidos por las normas internacionales, como las EN PLUS, ISO y ÖNORM. Por lo cual es una especie cuyas densidades se adaptan a diferentes tipos de sitios y condiciones.

Acerca del carbono fijo varió entre 14,40% – 17,31%, destacándose como el mejor resultado el obtenido en la D2 de La Isla. Además, hubo una variación muy baja ya que los valores son muy similares, tanto cuando se comparan ambas densidades en un mismo sitio como entre sitios. Asimismo, los resultados obtenidos son equivalentes a los encontrados por McKendry (2002), que señala valores de 15,9% en *Miscanthus spp.* Por otra parte, el estudio realizado por Saldarriaga *et al.* (2013) arrojó valores de 11,28% en *Miscanthus spp.*, los cuales son inferiores a los de este estudio. En este sentido, evaluar este parámetro es importante ya que tiene relación directa con la lignina, y ambos son resistentes a

la descomposición térmica. Por lo tanto, los valores hallados en este estudio son deseables, ya que aumentará el poder calorífico de la biomasa.

Otro punto son los volátiles, el mayor porcentaje de material volátil lo presentó el sitio El Vergel, con una media de 82,26%. Cuando comparamos ambas densidades entre sitios, se evidenciaron diferencias significativas. Estos resultados son mayores a los hallados por Santiago-Ortega *et al.* (2016), quienes mencionan valores de 66,8% en *Miscanthus spp.* De acuerdo con otro estudio realizado por Saldarriaga *et al.* (2013), los resultados arrojaron 76,58% de material volátil en *Miscanthus spp.*, lo cual es similar a lo hallado en el sitio de La Isla, indicando que el material es de rápida ignición.

Respecto a la composición elemental, el porcentaje de carbono no tuvo diferencias significativas. Solo si es comparado entre sitios, la D2 presentó diferencias entre los sitios. En este sentido, lo encontrado en este estudio es similar al valor de 44,96%, registrado por Delaye y MAIA (2015). Por otra parte, el valor de este estudio fue superior al registrado por Muñoz y Cancino (2014a), el cual fue de 41,90%, en ambos estudios se evaluó *Miscanthus spp.* Esta diferencia puede atribuirse a las condiciones de cada sitio o al cambio de densidad del plantío.

En cuanto al hidrógeno y nitrógeno cuando comparamos las densidades (D1-D2) entre el mismo sitio y entre ellos son muy parecidas entre sí. Los resultados son semejantes a los señalados por Muñoz y Cancino (2014a). Algunos valores pueden ser menores o mayores, esto se debe a que no existe

una estandarización para el cálculo, y estas cuantificaciones pueden ser en base seca como es el caso de este estudio, y a su vez, en base seca libre de cenizas.

En relación al azufre, los resultados fueron muy similares, destacando que las medias de todas las densidades y para todos los sitios fueron superiores al 0,1%. Resultados equivalentes fueron registrados en el estudio de Muñoz y Cancino (2014a). Es importante destacar que cuando este valor es elevado, puede ser perjudicial tanto para el ambiente, así como también disminuye los valores energéticos de las biomásas. Otro factor indeseable son los altos valores de oxígeno debido a la combustión de la biomasa, ya que el carbono e hidrógeno contribuyen en mayor proporción en la liberación de energía, para formar CO₂ y H₂O (Oberberger & Thek, 2010). Por lo tanto, estos parámetros no presentaron diferencias significativas relevantes. Consiguente, estos valores son aceptables y similares con otras biomásas no maderables.

Tabla 2.4. Resultados de la caracterización del *Miscanthus x giganteus*

Variable	La Isla				Trehualemu				El Vergel			
	D1		D2		D1		D2		D1		D2	
	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Lignina (%)	32,87 ^{bc}	0,93	36,14 ^a	0,44	34,01 ^{ab}	0,51	30,37 ^c	0,64	30,79 ^c	1,52	30,42 ^c	1,73
Extractivos (%)	5,77 ^b	0,12	3,51 ^{cd}	0,23	6,55 ^a	0,29	6,48 ^a	0,25	3,66 ^c	0,29	3,01 ^d	0,04
Cenizas (%)	6,02 ^a	0,01	77,56 ^b	0,30	4,28 ^c	0,08	79,08 ^d	0,26	2,67 ^e	0,05	82,15 ^d	0,29
Carbono fijo (%)	16,39 ^b	0,30	17,31 ^a	0,28	16,53 ^b	0,30	16,79 ^{ab}	0,18	15,24 ^c	0,19	14,40 ^d	0,23
Volátiles (%)	77,56 ^d	0,30	76,87 ^d	0,30	79,08 ^c	0,26	80,47 ^b	0,51	82,15 ^a	0,29	82,37 ^a	0,43
Carbono (%)	44,89 ^{ab}	0,24	45,25 ^a	0,13	43,18 ^b	0,15	43,67 ^c	0,18	47,57 ^a	0,61	44,37 ^b	0,17
Hidrogeno (%)	6,27 ^c	0,03	6,09 ^d	0,02	6,06 ^d	0,05	6,48 ^{ab}	0,04	6,36 ^{bc}	0,12	6,64 ^a	0,06
Nitrógeno (%)	0,42 ^{ab}	0,03	0,42 ^{ab}	0,05	0,74 ^a	0,05	0,52 ^a	0,23	0,51 ^a	0,15	0,13 ^b	0,05
Azufre (%)	0,26 ^{abc}	0,02	0,26 ^{abc}	0,01	0,27 ^a	0,01	0,23 ^c	0,02	0,27 ^{ab}	0,01	0,24 ^{bc}	0,02
Oxígeno (%)	41,98 ^c	0,49	42,09 ^c	0,19	45,52 ^{ab}	0,07	45,83 ^a	0,11	42,62 ^{bc}	2,75	45,55 ^{ab}	0,24
H, (base seca)	8,25 ^a	0,04	5,96 ^b	0,02	6,29 ^a	0,01	6,21 ^a	0,07	6,60 ^a	0,01	6,64 ^a	0,04
Dens, granel	117,38 ^a	0,48	116,80 ^b	0,36	114,47 ^a	0,18	112,72 ^b	0,31	113,68 ^a	0,33	114,38 ^a	0,37
PCI (MJ kg ⁻¹)	15,02 ^{ab}	0,12	15,37 ^{ab}	0,08	14,56 ^b	0,13	14,57 ^b	0,25	16,15 ^a	1,07	15,47 ^{ab}	0,24
PCS (MJ kg ⁻¹)	16,37 ^{ab}	0,12	16,73 ^{ab}	0,08	15,92 ^b	0,13	15,93 ^b	0,25	17,50 ^a	1,07	16,83 ^{ab}	0,24
PCL (MJ kg ⁻¹)	13,68 ^b	0,11	14,37 ^{ab}	0,08	13,55 ^b	0,12	13,57 ^b	0,24	14,99 ^a	1,01	14,35 ^{ab}	0,22
DEL (GJ m ⁻³)	1,61 ^{abc}	0,01	1,68 ^{ab}	0,01	1,55 ^{bc}	0,01	1,53 ^c	0,02	1,70 ^a	0,12	1,64 ^{abc}	0,02

D1 = 20.000 brotes ha⁻¹; D2 = 40.000 brotes ha⁻¹; D.E. = desviación estándar; H. (base seca) = Humedad base seca; Dens. granel = densidad a granel; PCI = poder calorífico inferior; PCS = poder calorífico superior; PCL = poder calorífico líquido; DEL = densidad energética líquida; Medias iguales por la misma letra no difieren entre sí, a 1% de probabilidad por el test Tukey. Todas las medias están expresadas en porcentaje %.

Por otra parte, también se puede observar los valores físicos y energéticos de *Miscanthus x giganteus* en la tabla 2.4. En este sentido, es posible constatar que la humedad osciló entre 5% – 10%. Estos resultados atienden los parámetros exigidos por las normas internacionales (antes mencionadas) para fines energéticos. Respecto a la densidad a granel del material es un parámetro que no está estandarizado, pero nos da referencia de cómo será la densificación y si el producto final tendrá una buena compactación, durabilidad y resistencia mecánica para productos densificados.

Respecto a los valores energéticos, es importante destacar que hubo poca variabilidad en relación a sitio y densidad. Al respecto, el sitio donde se obtuvo mejores valores energéticos fue El Vergel, aunque presenta diferencias significativas muy bajas en comparación a los otros sitios. En cuanto al PCS, se registró una variación entre 15,92 MJ kg⁻¹ – 17,50 MJ kg⁻¹. Estos valores fueron similares a los resultantes en el estudio de Muñoz y Cancino (2014a), y a su vez, son inferiores a otros estudios realizados en *Miscanthus* y otros residuos agrícolas por Meehan *et al.* (2013), donde se observaron valores superiores a 18,00 MJ kg⁻¹.

Los bajos valores energéticos encontrados en este estudio pueden atribuirse a la humedad y al alto porcentaje de cenizas que se registró, ya que este afecta directamente los valores energéticos. De modo general los valores energéticos son menores a los de la *Paulownia*, debido a que las biomásas maderables poseen menores porcentajes de cenizas, los cuales ayudan a

aumentar su poder calorífico, mientras que las biomásas herbáceas (*Miscanthus x giganteus*) poseen mayores porcentajes de cenizas los cuales son catalogados como indeseables. Otro aspecto importante de acuerdo con Baxter *et al.* (2014), es que la madera tiene más enlaces de carbono que las herbáceas, los cuales ayudan al aumento energético.

2.6.3. Análisis de los componentes principales (PCA)

Se observó que las tres primeras componentes principales explican el 0,988% de la varianza total, a pesar de tener cuatro. Por lo tanto, las informaciones más notables de los datos originales están incluidas en esas tres componentes. En la tabla 2.5, se encuentran los autovectores y las correlaciones entre variables originales y los cuatro primeros componentes principales (CP1, CP2, CP3 y CP4) consideradas.

Tabla 2.5. Autovectores (e) y las correlaciones (r) entre las variables originales y las cuatro primeras componentes principales.

Variables	CP1		CP2		CP3		CP4	
	e ₁	r	e ₂	r	e ₃	r	e ₄	r
DTG	0,19	0,50	0,39	0,77	-0,29	-0,34	0,12	0,12
Shoulder	0,11	0,28	0,41	0,81	-0,29	-0,34	0,31	0,29
Resíduo	0,34	0,88	0,10	0,19	-0,03	-0,03	0,01	0,01
Extractivos (%)	-0,30	-0,77	-0,21	-0,42	0,11	0,13	-0,04	-0,03
Lignina (%)	-0,14	-0,33	-0,28	-0,56	0,30	0,35	0,40	0,38
Cenizas (%)	0,33	0,87	0,03	0,07	-0,22	-0,26	0,20	0,19
Volátiles (%)	-0,12	-0,32	0,42	0,83	0,23	0,27	-0,27	-0,25
C. fijo (%)	-0,22	-0,57	-0,24	-0,46	-0,38	-0,45	0,47	0,44
Carbono (%)	-0,17	-0,45	0,33	0,66	0,32	0,38	0,14	0,13
Hidrogeno (%)	-0,03	-0,08	0,25	0,50	0,49	0,57	0,46	0,43
Nitrógeno (%)	-0,30	-0,79	-0,07	-0,14	-0,23	-0,28	0,17	0,16
PCI (MJ kg ⁻¹)	-0,34	-0,88	0,22	0,43	-0,10	-0,12	0,08	0,07
PCS (MJ kg ⁻¹)	-0,34	-0,88	0,22	0,43	-0,10	-0,12	0,08	0,07
PCL (MJ kg ⁻¹)	-0,33	-0,85	0,18	0,35	-0,16	-0,19	-0,09	-0,08
DEL (GJ m ⁻³)	-0,32	-0,83	0,06	0,11	-0,21	-0,24	-0,33	-0,31

C. fijo = carbono fijo; PCI = poder calorífico inferior; PCS = poder calorífico superior; PCL = poder calorífico líquido; DEL = densidad energética líquida

El componente principal 1 se encuentra altamente correlacionado con los extraíbles, lignina, los poderes caloríficos, DTG, cenizas y residuo, por el cual puede ser interpretado como un índice de rendimiento energético. Cuando los valores de estas variables son mayores aumentará el valor numérico (score) del componente principal 1 (CP1) y más propicia será la biomasa para la producción de bioenergía.

Analizando la segunda componente principal (CP2), se puede percibir que los mayores coeficientes en el módulo, se refiere a los porcentajes de hidrógeno, carbono y volátiles. El tercer componente (CP3), puede ser interpretado como el índice de polución ambiental y no como aprovechamiento energético de

biomasas, ya que los mayores coeficientes de estos componentes son relativos a nitrógeno, cenizas y residuo.

Para la producción de bioenergía es deseable que la madera (biomasa) presente altos porcentajes de carbono e hidrógeno y bajos porcentajes de oxígeno y cenizas, en recurrencia de las relaciones existentes entre esas componentes elementales y el poder calorífico (Protásio *et al.*, 2011). Las variables más importantes para la clasificación y selección de biomasas para la generación de bioenergía, presentan una mayor contribución en estos dos componentes. En este diagrama (Figura 2.1), se observa la alta correlación de la lignina, extraíbles, carbono fijo, PCS, PCL y PCI, lo cual puede ser interpretado como un índice de rendimiento energético, ya que a mayores valores de estas variables mayor será el valor numérico (escores) de ese componente principal 1.

Los extractivos y la lignina ejercen un importante papel en el uso de la madera, ya que pueden influenciar en las propiedades físicas y energéticas (Vargas-Moreno *et al.*, 2012), y dependiendo de la estabilidad térmica estas sustancias pueden ayudar al rendimiento de los *pellets*. Los resultados encontrados demuestran el potencial energético de estas dos biomasas (*Paulownia* y *Miscanthus*), y que puede resultar una opción para diversificar la matriz energética y también un aprovechamiento económico de estas biomasas.

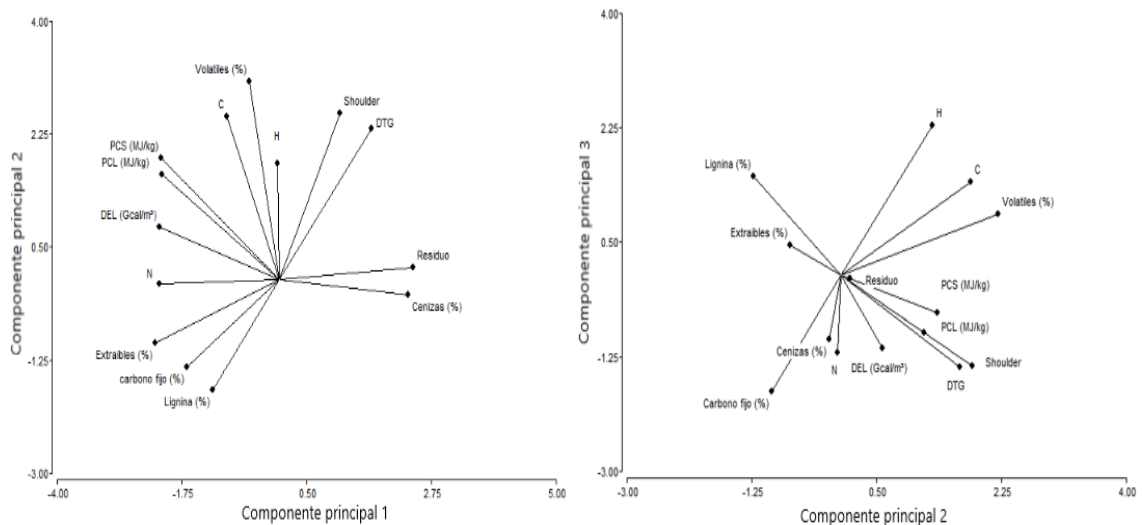


Figura 2.1. Diagrama de ordenación de variables originales y scores de las tres primeras componentes principales.

2.6.4 Características termogravimétricas de *P. elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*

Las curvas termogravimétricas (TG) y los diferenciales termogravimétricos (DTG) se muestran en las figuras 2.2. La primera pérdida de peso ocurre en un rango de temperatura de 70 °C – 150 °C para *Paulownia* y entre 40 °C – 120 °C para *Miscanthus*, constituyendo una pérdida de peso de aproximadamente 10% en ambas especies. Esta pérdida de peso se atribuyó a la evaporación del agua, después comienza una segunda pérdida de peso en el rango de 290 °C – 320 °C para *Paulownia* y entre 270 °C – 310 °C para *Miscanthus*, se le atribuye a la exclusión de las hemicelulosas. La tercera pérdida (referente a la lignina), que se degrada en un amplio rango de temperatura (350 °C – 600 °C), no muestra un pico característico como el de la hemicelulosa y celulosa (Poletto *et al.*, 2014).

Después de ocurrir estas tres pérdidas se puede eliminar hasta un 95% del peso en ambas especies, estas pérdidas de peso se atribuyen principalmente a la celulosa (Sebio-Puñal *et al.*, 2012).

Cada uno de estos componentes principales de las biomásas (hemicelulosa, celulosa y lignina), tienen su propio perfil de degradación térmica. El primer componente (hemicelulosa) son estructuras amorfas aleatorias y se pueden degradar fácilmente, el segundo componente es la celulosa que es polímero relativamente largo y son organizados (cristalinizado) y alta estabilidad térmica (Poletto *et al.*, 2014). Por último, está la lignina que, de acuerdo con el mismo autor, posee tres tipos de unidades de benceno-propano fuertemente entre cruzadas, lo cual le otorga una alta estabilidad térmica y de degradación.

Finalmente ocurren unos picos estrechos en ambas biomásas en los rangos entre 430 °C – 500 °C, que se relaciona con la descomposición y oxidación de la lignina residual y la combustión del carbono fijo formado entre la segunda y tercera fase. Estos picos corresponden a la combustión homogénea de gases liberados por la descomposición de la lignina y la combustión heterogénea de carbono sólido de acuerdo con Moon *et al.* (2013). Estos resultados son similares a los encontrados por Chen *et al.* (2017) en *Paulownia*, a pesar de que en su investigación el residuo fue de 25% superior a los encontrados en este estudio que fue de 2,95%. Respecto al *Miscanthus*, los valores aumentaron en relación a la *Paulownia*, tanto en el pico de hemicelulosa como en el de la celulosa. Estos resultados son semejantes a los de Wilk *et al.*

(2017), quienes estudiaron *Miscanthus in natura* y torrefactado. Los mismos autores determinaron que los valores de hemicelulosa como de la celulosa son muy similares, salvo que las propiedades del material torrefactado se mejoran hacia el carbón lógicamente. Por lo tanto, estas especies presentan un perfil térmico considerable para un posible uso energético y ayudar a diversificar la gama de especies para la producción de energía.

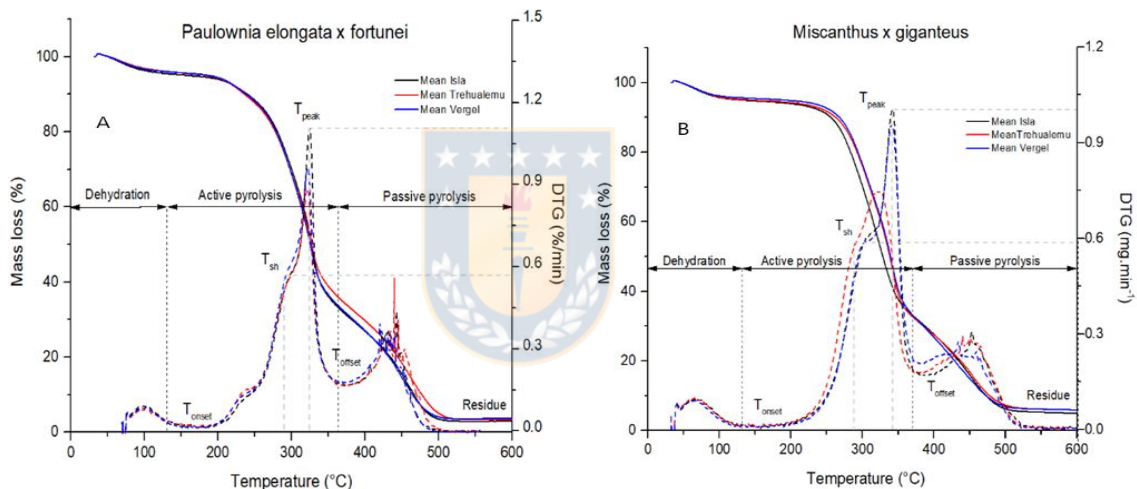


Figura 2.2. Curvas de TG (A) y DTG (B) de la *Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus giganteus*. T_{onset} = temperatura de ignición; T_{sh} = temperatura máxima de degradación de la hemicelulose; T_{peak} = máximo general de la pérdida de masa; T_{offset} = valor final de la descomposición de la celulosa y zona de pirólisis activa.

Por otra parte, en la tabla 2.6 se muestran las temperaturas de degradación térmica de la biomasa y la masa residual a los 600 °C atribuible al carbón (char). Como podemos observar en ambas especies, la *Paulownia* tiene el peor comportamiento a medida que aumenta la temperatura, ya que tiene las temperaturas de inicio y final muy bajas; además, alcanza su mayor tasa de cambio de masa en la temperatura más baja (Tabla 2.6). Estos resultados son

similares a los relatados por Villanueva *et al.* (2011), aunque comparados con otros géneros como el eucalipto, pino o *populus* es bajo. Estas temperaturas son considerablemente más bajas que la del carbón vegetal ya que de acuerdo con Sahu *et al.* (2010), la temperatura de ignición del carbón empieza a los 360 °C. Pero la relevancia de estos resultados es que son similares a otras biomásas que hoy en día son utilizadas para la bioenergía, por lo tanto, son especies que pueden traer beneficios con sus plantíos.

Tabla 2.6. Temperatura de degradación térmica y su residuo (char) a 600 °C de *Paulownia* y *Miscanthus*

Especie	Sitio	T _{in} (°C)	T _{ter} (°C)	T° Shoulder (°C)	Temperatura Peak (°C)	Residuo (%)
<i>Paulownia</i>	La Isla	197.76 (±0,12)	377.76 (±0,12)	296,11 ^(±1)	329,00 ^(±1)	2,95 ^(±1)
	Trehualemu			295,11 ^(±1)	325,67 ^(±1)	3,34 ^(±1)
	El Vergel			295,44 ^(±1)	326,00 ^(±1)	3,70 ^(±1)
<i>Miscanthus</i>	La Isla	209.66 (±0,21)	379.18 (±0,21)	287,66 ^(±1)	323,00 ^(±1)	5,00 ^(±1)
	Trehualemu			306,83 ^(±1)	341,33 ^(±1)	5,95 ^(±1)
	El Vergel			304,49 ^(±1)	340,83 ^(±1)	5,94 ^(±1)

T_{in} = Temperatura inicial de la pirolisis; T_{ter} = Temperatura final de la pirolisis

Por otro lado, en la tabla 2.7 se presenta un resumen de las clasificaciones de las biomásas analizadas en este estudio, de acuerdo con normas internacionales (alemanas), las cuales son unas de las más rigurosas en cuanto a calidad.

Una vez analizados los resultados de la *Paulownia elongata x fortunei*, se puede evidenciar que el sitio que presentó los mejores resultados fue El Vergel, debido a que atendió la mayoría de los parámetros evaluados en este estudio. Al

respecto, es importante destacar que los parámetros que no cumplen la norma se ubicaron muy cerca de los valores establecidos, como fue el azufre que no atendió los valores de la norma debido a la cercanía del sitio al mar, permitiendo con ello, recibir altas concentraciones de este componente. Este aspecto se debería tomar en consideración para posibles plantíos dendroenergéticos. Por lo tanto, se considera que el sitio El Vergel, a pesar de sus limitaciones de sitio, presentó los mejores resultados para plantar esta especie con fines energéticos.

Respecto al *Miscanthus x giganteus* sucede el mismo caso, los mejores valores se reportaron en El Vergel, destacando que la mayoría de los resultados son considerados como categoría A que corresponden a la clasificación de mejor calidad. Cabe destacar que para biomasas no maderables los parámetros son menos rigurosos. Los análisis de los parámetros energéticos a la biomasa de esta especie, indican que creció bien en estas condiciones y puede ser plantada en diferentes sitios sin ningún problema para fines energéticos.

Tabla 2.7. Clasificación de las biomásas de acuerdo con las normas de calidad.

Normas	Biomásas	Sitio	Densidad	Dens. a granel (kg m ⁻³)	Humedad _{bs}	PCL (MJ kg ⁻¹)	Cenizas (%)	Azufre (%)	Nitrógeno (%)
Biomásas maderables EN 14961-2 (DIN, 2011b)	<i>Paulownia</i>	Trehua	D1	✓	✓	X	✓B	X	✓A
		La Isla	D1	✓	✓	X	✓A	X	✓A
		El Vergel	D1	✓	✓	X	✓A	X	✓A
Biomásas no maderables EN 14961-6 (DIN, 2012a)	<i>Miscanthus</i>	Trehua	D1	✓	✓	✓B	✓A	X	✓A
		Trehua	D2	✓	✓	✓B	✓A	X	✓A
		La Isla	D1	✓	✓	✓B	✓B	X	✓A
		La Isla	D2	✓	✓	✓A	✓B	X	✓A
		El Vergel	D1	✓	✓	✓A	✓A	X	✓A
		El Vergel	D2	✓	✓	✓A	✓A	X	✓A

Dens. a granel = densidad a granel de las biomásas; Trehua = Trehualemu; ✓: parámetro cumplido; X = parámetro no cumplido; A – B: clasificación de acuerdo con las normas.

1.13. CONCLUSIONES

La especie *Paulownia elongata x fortunei* varió muy poco en sus propiedades químicas y energéticas entre los diferentes sitios, mostrando un buen nivel de adaptación. Los mejores resultados referentes a energía (lignina, extractivos, PCL y DEL) se registraron en El Vergel.

Respecto a la especie *Miscanthus x giganteus*, se puede decir que las características varían de acuerdo con el sitio y las densidades de los plantíos. Las condiciones (mediterráneas) del sitio El Vergel son ideales para el establecimiento de esta especie con fines energéticos.

Ambas biomásas (*Paulownia* y *Miscanthus*) presentan termogramas de combustión diferentes y en fases distintas, determinándose que el material

lignocelulósico muestra aptitud para la producción directa de calor, debido a su baja temperatura de ignición.

El análisis de componentes principales generó grupos homogéneos de las variables analizadas para identificar parámetros bioenergéticos, indicando que las biomásas evaluadas es fuente directa de bioenergía, esto por sus elevados valores caloríficos. En general, ambas especies se establecen bien luego de ser plantadas en los diferentes suelos y poseen un potencial energético interesante para ser utilizadas a una escala comercial.



2. CAPÍTULO III. INFLUENCE OF LIGNIN DISTRIBUTION, PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND MICROSTRUCTURE ON THE QUALITY OF BIOFUEL PELLETS MADE FROM FOUR DIFFERENT TYPES OF BIOMASS

ABSTRACT

The worldwide increase in the demand for wood pellets has led to a shortage of wood and increased interest in the use of biomass feedstock produced from short rotation crops, logging residues, whole-tree harvesting and mixtures of agricultural and forest biomass. In this study, the quality of pellets made from four different types of raw biomass material was evaluated: *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens* (both 5 years old, wood+bark+branches), *Paulownia elongata* (4 years old, wood+bark+branches) and the non-woody species *Miscanthus giganteus* (whole, aboveground plant). The aim of the study was to characterize the physical, chemical, mechanical and energy properties of pellets made from these species, as well as to use microscopic techniques (scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy) to examine how the lignin distribution influences the mechanical properties. The findings show that the pellets made from *Pinus* and *Eucalyptus* were more suitable for bioenergy production than those made from *Paulownia* and *Miscanthus*. The Cl and N contents were the main factors limiting the use of *Eucalyptus* pellets, whereas *Paulownia* pellets were mainly limited by bulk density and durability, and *Miscanthus* pellets produced poorer results for a number of parameters (ash, S, Cl, bulk density, durability and heating value). Overall, the *Pinus* pellets yielded

the highest fuel value index. The anatomical structure proved to be important in relation to pellet quality, as clear areas in the range 2.24-11.02 mm² were observed. This parameter was correlated with the percentage of biomass lignin (which ranged from 26.4–34.2%), and lower values were obtained for *Paulownia* and *Pinus* pellets. The pellets were therefore more durable and had fewer empty spaces between particles, indicated by a lower percentage of fines. The pellets made from Eucalyptus, which was the material most difficult to compact, had abundant cracks.

Keywords: Bioenergy, pelletization, microscopy techniques, mechanical durability.



3.1. INTRODUCTION

The need to reduce greenhouse gases was addressed by the agreements signed in the Kyoto Protocol and confirmed in the climate conference (COP21) held in France in December 2015 (Adams & Lindegaard, 2016) and ratified at COP25 Chile/Madrid in 2019. Considering the importance of implementing a more viable form of energy, agroforestry biomass is considered an abundant renewable source for the production of solid biofuels, such as wood pellets (Pegoretti *et al.*, 2020). Pellets are made by compacting sawdust mixtures and other by-products of agroforestry operations, and their physical, chemical and energy properties can be improved by selecting suitable raw materials and fabrication processes. In

Chile, the total area covered by forest plantations amounts to 2.3 million ha, mainly composed of *Pinus radiata* (75%) and *Eucalyptus* (17%) (INFOR, 2019), representing potentially valuable biomass for pellet production.

Pellets are currently made exclusively from wood (sawdust, shavings or chips). However, the increase in demand for pellets has resulted in a shortage in the wood supply. As a consequence, interest has arisen in the use of alternative feedstocks produced from short rotation crops, additional biomass components (bark, branches) derived from whole tree harvesting, and mixtures of agricultural and forest biomass (Pegoretti *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020). In the present study, the four species were evaluated (*Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus* and *Pinus*) and bark was included as it is currently used for energy production (Reina *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018) and its inclusion reduces the waste and by-products generated from the agroforestry production chain. However, the variability and the presence of impurities (ash) are problematical as they infer significant loss of the calorific value of the fuel.

Chemical properties are often studied in relation to pellet quality, as they account for most of the variability in quality. For example, chlorine content is considered an important parameter regarding the potential use of pellets (Kirsten *et al.*, 2016; Jagustyn *et al.*, 2017), because its presence can lead to corrosion of equipment and emission of gases that are harmful to humans. However, studies involving anatomical evaluation of pellets are scarce, although they may be

essential to try to explain the factors influencing the durability and mechanical properties of pellets (Tsoumis, 1991).

Scanning electron microscopy (SEM), which uses an electron beam rather than light to produce images, is considered an effective technique and helps to provide information on the benefits or disadvantages of the morphological components. Lignin spheres on the surface of pre-treated lignocellulosic fibres have been identified using SEM. The spheres can range in size from the order of nanometers up to several microns, and they may influence recalcitrance and mechanical parameters, although there are conflicting theories regarding whether the influence is positive or negative (Li *et al.*, 2014). However, the evaluation is even more efficient when this technique is complemented with confocal laser scanning microscopy (CLSM), which detects fluorescence from selected, narrow focal planes in order to produce high-resolution images for the three-dimensional representation of an object (e.g. biomass and pellets). The CLSM technique has been widely used to study lignocellulosic materials (De Souza & Sant'Anna, 2012), particularly due to the strong autofluorescence (intrinsic fluorescence, without addition of fluorophores) of lignin (Olmstead & Gray, 1997). Lignin fluoresces when excited by light in the UV-Vis range (Hernández-Hernández *et al.*, 2014). Both SEM and CLSM can detect biomass compaction, cracks, irregular surfaces and lignin distribution, which influence pellet quality.

Microscopic analysis of the four biomass species may be of great interest in determining pellet quality because the lignin distribution can influence the

physical and mechanical properties of the pellets. On the other hand, the percentage, composition and distribution of lignin in the cell wall of each biomass can affect the formation of cracks in the pellets. Cracking results in lower quality pellets as the cracks can generate fines during handling and transport. The aim of this study was to characterize the physicochemical, mechanical and energetic properties of the pellets, and also to use SEM and CLSM to evaluate the distribution of lignin in order to identify and evaluate the microscale properties influencing the quality of these solid fuels. In addition, the study aimed to evaluate which of the types of biomass studied (*Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus*, and *Pinus*) shows the greatest potential for producing pellets with good combustibility and suitable characteristics for domestic and industrial use.



3.2. MATERIALS AND METHODS

3.2.1. Biomass

The sources and characteristics of the biomass samples are shown in Table 3.1. The *Paulownia elongata x fortunei* (hereinafter *Paulownia*) samples were obtained from 2-year-old wood energy plantations established for the project (FONDEF B09I 1008) in the vicinity of the city of Concepción, Chile (Muñoz & Cancino, 2014b). The *Miscanthus x giganteus* (hereafter *Miscanthus*) samples were obtained from one-year-old crops located near the city of Angol (Chile), established for the project (FONDEF B09I 1008) (Muñoz & Cancino, 2014a). The *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens* material (hereinafter *Pinus* and *Eucalyptus*,

respectively) was obtained from 5-year-old commercial plantations, located in Concepción and Collipulli (Chile), respectively. These samples are representative of early whole-tree harvesting in energy thinning of forest plantations. Particles of length 3-6 mm are generally used for manufacturing pellets. In this study, the biomass samples (*Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus* and *Pinus*) were ground to manufacture pellets of average particle size 4 mm.

Table 3.1. Source and characteristics of the species samples under study

Species	Region location	Biomass type	MC (%)	DBH (cm)	Bark (%)	Biomass density (kg m ⁻³)	Planting density
Raw <i>Paulownia</i>	Concepción (VIII)	Trunk, branches, and bark	5.15	---	---	289.20	1000 trees ha ⁻¹
Raw <i>Miscanthus</i>	Angol (IX)	Whole plants	5.51	---	---	249.05	20000 sprouts ha ⁻¹
Raw <i>Eucalyptus</i>	Collipulli (VIII)	Trunk, branches, and bark	7.40	17.2	11.30	491.33	1100 trees ha ⁻¹
Raw <i>Pinus</i>	Concepción (IX)	Trunk, branches, and bark	5.47	15.2	8.50	367.35	1100 trees ha ⁻¹

MC = moisture content; DBH = diameter at breast height (1.30mts)

3.2.2. Physical, chemical, and energetic characterization of the biomass

The four species were collected with bark, and the material was ground and subsequently analyzed. The moisture content (dry basis) of the biomass was determined according to DIN EN 14774-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2010a). The bulk density was determined according to DIN EN 15103 (Deutsches Institut Für Normung, 2010c). The chemical composition and higher heating value

(HHV) of the samples were determined with a Wiley-type laboratory mill, in accordance with the TAPPI 257 cm-85 standard (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1985).

For characterization of the chemical composition of the biomass, the extractive content was determined according to the TAPPI 204 cm-97 standard (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1997), by the total extractive method, carried out with 90% acetone. The lignin content was determined by acid hydrolysis according to Mendonça *et al.* (2008).

Volatile matter was determined according to DIN EN 51720 (Deutsches Institut Für Normung, 2001) and the ash content, according to DIN EN 14775 (Deutsches Institut Für Normung, 2007), fixed carbon was calculated by the difference. The elemental (ultimate) composition (C, H, N and S) was determined in a Vario Micro Cube CHNS-O Elementar® unit, in accordance with DIN EN 15104 (Deutsches Institut Für Normung, 2011c). The O value was determined by the sum of the ultimate composition and ash content subtracted from 100, in accordance with DIN EN 15296 (Deutsches Institut Für Normung, 2011e).

To determine the higher heating value (HHV), a model PARR 6400 calorimetric pump was used, in accordance with DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b). The lower heating value (LHV) was estimated with the formula (3.1), according to DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b).

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 206\text{H} \quad (3.1)$$

where: LHV is the lower heating value (kJ kg^{-1}), HHV is the higher heating value (kJ kg^{-1}), and H is the hydrogen amount (% , dry basis).

The net heating value (NHV) was estimated with the formula (3.2), according to Annex E of DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b).

$$\text{NHV} = [\text{HHV} - 206 * \text{H}] * (1 - 0.1 * \text{MC}_{\text{wb}}) - (23.05 * \text{MC}_{\text{wb}}) \quad (3.2)$$

where NHV is the net heating value (kJ kg^{-1}); LHV is the lower heating value (kJ kg^{-1}); H is the hydrogen content (% , dry basis); and MC_{wb} is the mean moisture content on a wet basis (%). The energy of vaporization (constant volume) for water at 25°C is $41.53 \text{ kJ mol}^{-1}$. This value corresponds to 206 kJ kg^{-1} for 1% (m/m) of hydrogen in the biomass or 23.05 kJ kg^{-1} for 1% (m/m) of moisture, respectively.

The net energy density (NED) of the biomasses was calculated using the formula 3.3, where NED is net energy density and BD refers to bulk density.

$$\text{NED} = \text{BD} * \text{NHV} \quad (3.3)$$

3.2.3. Pellet production and evaluation

The particle size of the crushed biomass for the manufacture of pellets was 4 mm and the moisture content varied between 5 and 9% depending on the species (Table 3.1). The high density of the *Eucalyptus* material made it difficult to pelletize, and it was pelletized to a moisture content of about 12%. The pellets

were produced in a horizontal die pelletizing press (KHAL 33-390) with a nominal capacity of 300 kg/h and was equipped with a 200 kW motor (45–60 A). The diameter of the pellets was 10 mm in order to have more surface area for microscopic analysis and the pelletizing temperature varied between 80-100°C. This matrix was used to produce pellets with a larger surface area for the analysis by SEM and CLSM. The pellets were analyzed (physical, chemical, and energy) using the same procedures as for the raw biomass. In addition, solid density was determined according to DIN EN 52182 (Deutsches Institut Für Normung, 1976), chlorine content according to DIN EN 15289 (Deutsches Institut Für Normung, 2011) and mechanical durability according to DIN EN 15210-1 (Deutsches Institut Für Normung, 2005).



3.2.4. Energy performance index (Fuel Value Index - FVI)

For classifying the pellets of each species, the FVI was calculated according to Purohit & Nautiyal (1987). High values of HHV and biomass density are considered positive characteristics as they are desirable for energy production, while high values of ash content and moisture content are considered negative, as they decrease the energy performance. However, the wood moisture content varies along the stem and in different seasons. Thus, the FVI was estimated using the formula 3.4 (considering moisture content percentage), according to Cardoso *et al.* (2015), as FVI_1 . The FVI was also calculated using

the formula 3.5 (without considering the percentage of humidity), according to Bhatt & Todaria (1990) and Musule *et al.* (2018), as FVI₂.

$$FVI_1 = \frac{\text{Higher heating value (MJ kg}^{-1}) \times \text{bulk density}}{\text{moisture (\%, dry basis)} \times \text{ash content (\%)}} \quad (3.4)$$

$$FVI_2 = \frac{\text{Higher heating value (MJ kg}^{-1}) \times \text{bulk density}}{\text{ash content (\%)}} \quad (3.5)$$

3.2.5. Microscopic imaging

For SEM analysis, four pellets of each species were randomly sampled. Longitudinal and transverse cuts were made with a microtome (Figure 3.1A) for producing images of each sample (Figure 3.1B). The raw material (particles) and the pellets were mounted in sample holders with carbon tape, and a conductive coating (25k gold for 60 s) was applied using a metallizer (SPI-MODULE coated by sputtering). Images were obtained with a JEOL JSM-6380LV (SEM) scanning electron microscope connected to a personal computer for image capture. SEM micrographs were obtained at four levels of magnification (5, 10, 50 and 100 μm).

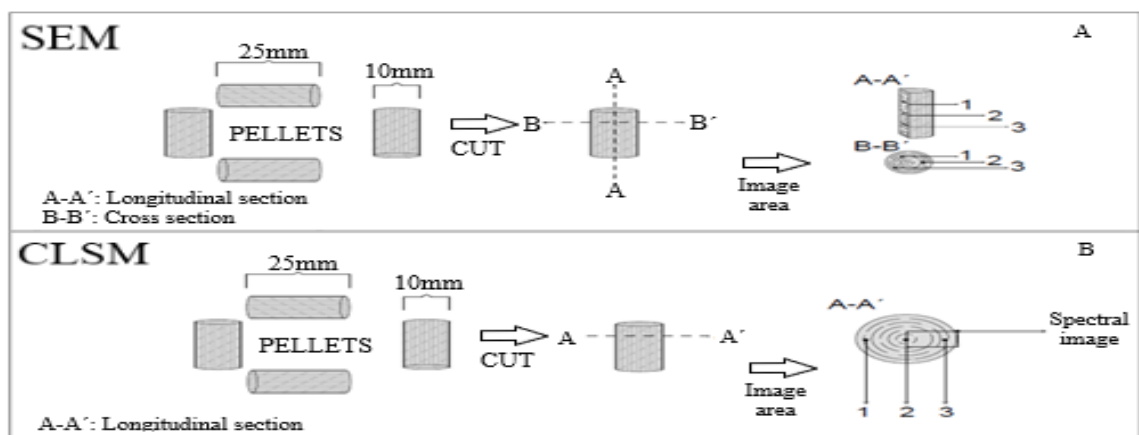


Figure 3.1. Dimensions and areas where the pellet images were obtained for the four species.

To obtain images by means of the Zeiss spectral confocal microscope (CLSM) model LSM780, different laser lines were used to excite autofluorescent elements in a cross section of pellet samples cut on a cryostat. Cross-sectioned pellet samples (Figure 3.1B) were used to select the analytical areas, and 3 areas were selected for analysis of each sample (left edge, centre and right edge).

For analysis of the autofluorescence signal, a spectral scan was performed using the 405 nm laser line to detect emission spectra every 8.8 nm. Several autofluorescent components were subsequently used at different emission wavelengths, with the same areas selected above to perform an acquisition with 4 lines of lasers, in which the emission spectra of each were configured as follows: Laser Ex 405 nm, range 405–480nm; Laser Ex 488 nm, range 490–560 nm; Laser Ex 561 nm, range 560–630 nm; and Laser Ex 633 nm, range 630–700 nm. The images were obtained using compilations of images every 1 μm in the Z plane, and the acquisition values (power of the laser lines and sensitivity of the detector) were retained for all samples analyzed. Finally, the maximum intensity projection of each area analyzed was observed using the spectra in which principal component analysis was performed for 3 autofluorescent components.

The two quality control methods (SEM and CLSM) were also used to detect cracks and clear areas on the surface of the pellets. The number of cracks in each granule was determined using the SEM digital images for five pellets (cracks/mm). For clear areas, the images were analyzed by ImageJ software (National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA). The digital image in TIFF format is

filled to a threshold value of 208. Areas with a colour above the 208nm threshold were then used to represent high density regions. These regions were compared in relation to their frequency (quantity/mm²), and area percentages with high density were compared to the total pellet area and the clear area identified.

3.3 STATISTICAL ANALYSES

A completely randomized design (CRD), in which each property was quantified in three replicate samples of each species, was established. The central trends of mean and standard deviation were calculated, and the Lilliefors test was used to verify the normality of the distribution. The Cochran test was used to check the homogeneity of the variances. Finally, analysis of variance was used to evaluate the physicochemical, mechanical and energy characteristics of the pellets. When significant differences between species were indicated, the Tukey test was used to compare the means and applying a 5% probability level. Multivariate principal component analysis (PCA) was then performed on the variables FVI₁, FVI₂, DB, MC, AC, AND HHV in order to reduce the size of the data set, preserving the variation in data in order to verify the influence of each variable and its correlation. The correlations between the biomass characteristics and pellets properties were evaluated. Finally, the combustibility index (FVI) was used to classify the energy potential of the pellets.

3.4. RESULTS AND DISCUSSION

3.4.1. Physical, chemical, and energy characteristics of the biomasses

The moisture content ranged between 5.16 and 7.40% (Table 3.2), thus fulfilling the criteria established in the relevant international standards for biomass use for energy purposes (*Deutsches Institut Für Normung*, 14961–2).

Table 3.2. Physicochemical parameters of the biomasses of the four species studied

Properties	<i>Paulownia elongata x fortunei</i>	<i>Miscanthus x giganteus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>	<i>Pinus radiata</i>
MC (dry basis)	5.16 ^A (0.04)	5.51 ^A (0.09)	7.40 ^B (0.22)	5.47 ^A (0.36)
Extractives (%)	9.17 ^C (0.12)	3.66 ^B (0.54)	2.16 ^A (0.31)	3.81 ^B (0.11)
Lignin (%)	34.2 ^C (0.69)	29.8 ^B (0.14)	26.4 ^A (0.47)	33.7 ^C (0.54)
Carbon (%)	46.3 ^B (0.17)	43.7 ^A (0.15)	46.5 ^B (0.28)	47.6 ^C (0.02)
Hydrogen (%)	6.34 ^{AB} (0.13)	6.21 ^{AB} (0.14)	6.22 ^{AB} (0.30)	6.27 ^{AB} (0.30)
Nitrogen (%)	0.36 ^B (0.02)	0.31 ^A (0.01)	0.70 ^D (0.01)	0.50 ^C (0.01)
Oxygen (%)	45.84 ^A (0.26)	47.03 ^C (0.25)	46.48 ^B (0.09)	45.16 ^A (0.30)
Volatiles (%)	79.78 ^A (0.05)	80.50 ^{AB} (0.10)	80.30 ^A (0.57)	81.40 ^B (0.16)
Fixed carbon (%)	19.10 ^C (0.07)	16.80 ^A (0.10)	19.10 ^C (0.30)	18.10 ^B (0.19)
Holocellulose	54.00 ^A (0.21)	62.90 ^B (0.53)	70.30 ^C (0.72)	62.10 ^B (0.51)
Sulfur (%)	0.02 ^A (0.01)	0.10 ^B (0.02)	0.01 ^A (0.01)	0.02 ^A (0.01)
Ash (%)	1.16 ^B (0.04)	2.67 ^C (0.08)	0.73 ^{AB} (0.01)	0.46 ^A (0.03)
Chlorine (%)	0.004 ^A (0.00)	0.070 ^D (0.00)	0.045 ^C (0.00)	0.019 ^B (0.00)

() = standard deviation; MC. (dry base) = moisture content; Different letters (row) indicate significant differences (Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$).

Extractive components are important in biomass as, together with lignin, they contribute to increasing the calorific value (Akdeniz *et al.*, 2018). The findings of the present study showed significant differences between the species, with extractives in *Paulownia* reaching 9.17%; this is a positive finding as extractives help to increase the calorific value and biofuel quality. The values observed for extractives were similar to those reported by Muñoz & Cancino (2014b) for

Paulownia and *Miscanthus*, as well as being similar to those reported in study carried out by Protásio *et al.* (2013) with *Eucalyptus* and *Pinus*.

The lignin contents reflect significant differences between the species, with the highest values observed for *Paulownia* (34.2%) and *Pinus* (33.7%). The values for *Eucalyptus* are similar to those reported by Garcia *et al.* (2019), whereas the values for *Pinus* were higher than those reported by Garcia *et al.* (2017).

The ultimate composition (carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and oxygen - CHNS-O) is important with respect to bioenergy. In general, it can be inferred that the pellets from forest biomasses present higher percentages of carbon and hydrogen than the pellets from herbaceous plants. It is desirable that the raw biomasses present high contents of carbon and hydrogen and low percentages of oxygen and ash in order to obtain better biofuel performance (Leite *et al.*, 2014).

The C value differed significantly between species. The highest values corresponded to *Paulownia* and *Eucalyptus* (46.3 and 46.5%, respectively) and were similar to those reported by Fernández-Puratich *et al.* (2014) in a study involving *Paulownia*. In *Miscanthus*, which is a non-woody biomass, the C value (44.7%) was higher than reported by Pereira (2014) for different types of agricultural biomass, such as *Pennisetum purpureum Schum* (46.5%) and *Oryza spp.* (39.5%). Regarding H, there were no differences between species, and the values were similar to previously reported values (Garcia *et al.*, 2019; Pereira, 2014). The C and H will both contribute to greater energy release during

combustion. Pellets made from forest biomass usually yield higher C and H values than those made from herbaceous plants (Leite *et al.*, 2014).

Elements such as O, N, and S are less desirable. There were significant differences between N content of the four species, with *Eucalyptus* and *Pinus* biomass exceeding 0.50%. Overall, the average N content was 0.46%, which is similar to previously reported values (Oberberger *et al.*, 2006). This component can be harmful to the environment, due to the release of NO_x during combustion. The potential release of this gas limits the domestic use (small scale) of some pellets, while on an industrial scale, the gas can be controlled and pellets with higher percentages of N can be used with minimal environmental impact. In this regard, the values obtained for the *Miscanthus* species were much lower than expected (N, 0.31%). Agricultural residues typically have higher percentages of these elements, although less rigorous standards are applied than for wood pellets.

The S contents were similar for all species and remained below or equal to 0.1 (*Miscanthus*). Values above this threshold have been associated with corrosion of equipment (stoves and boilers) because S favours the formation of alkaline salts (Oberberger *et al.*, 2006). In turn, high ash content is an undesired parameter in the bioenergy sector, as it is also associated with corrosion of the equipment during combustion (Vassilev *et al.*, 2015). In this regard, the studied species showed values within the requirements established in international

standards. As expected, the highest value was obtained for *Miscanthus* (2.67%), a herbaceous biomass that yields higher values than timber biomass.

Chlorine (Cl) content is an important parameter in species selected for energy use, and the international standards are therefore quite rigorous. Thus, even if the species has excellent energy potential, the material can be rejected for making pellets if the Cl content is above a certain level. Therefore, this factor continues to be widely studied in order to reduce or even neutralize the gases at the time of combustion, as concentrations above 0.02% are considered harmful, as established in the standards. Consequently, in the present study only the *Paulownia* and *Pinus* pellets met the Cl requirements for domestic use. The high percentage of Cl in biomass may lead to the formation of dioxins and furans, which are harmful to human health and the environment (Luscombe & Brasil, 2004). Chlorine facilitates reactions between K and Si, leading to the formation of ash deposits and slag at normal boiler operating temperatures (Llorente *et al.*, 2006). Therefore, the higher percentages of Cl in the *Eucalyptus* and *Miscanthus* biomass indicate a greater potential for slag formation and scale in the combusting equipment.

The Cl content of *Eucalyptus* pellets (mean 0.04%) was two times higher than the recommended standards. *Eucalyptus* species generally have Cl contents higher than the standard thresholds, and this value was similar to that reported by Pereira (2014). The options available for avoiding discarding this readily available biomass are to use it in mixtures of other types of biomass with lower Cl content

(Pereira, 2014) or torrefaction of biomass to decrease CI by volatilization. However, this aspect should be studied in greater detail to clarify this point, as some species are currently not being considered for energy use.

3.4.2. Physical, chemical, and energy characteristics of the pellets

Physical properties such as bulk density provide a quantitative reference of the level of compaction. Mechanical durability indicates the ability of the pellets to withstand physical disintegration. Thus, pellets with low durability can cause problems in the conveyor belts and the combustion chamber (Carroll & Finnan, 2012). In this respect, the bulk density values are higher than those required by the standard ($\geq 600 \text{ kg m}^{-3}$) for all species, except *Paulownia* (Table 3.3). These samples presented the lowest bulk density (604 kg m^{-3}), along with lower mechanical durability (96.25%) and the highest percentage of fines; by contrast, these pellets presented the second highest value for number of cracks/mm. By contrast, the bulk density values were highest in *Eucalyptus* and *Pinus* pellets, which consequently produced the best results for mechanical durability; this in turn translates to a lower percentage of fines, corroborating the results of other such studies (Pegoretti *et al.*, 2020). It can therefore be assumed that the higher density indicates greater mechanical durability and thus a high-quality biofuel. The lignin distribution was also more suitable in these two species and helped compaction.

Table 3.3. Energy parameters of the pellets in the four species studied

Property	<i>Paulownia elongata x fortunei</i>	<i>Miscanthus x giganteus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>	<i>Pinus radiata</i>
B. density (kg·m⁻³)	604.29 ^A (4.46)	615.00 ^B (1.59)	693.40 ^D (0.71)	633.17 ^C (1.27)
Durability (%)	96.25 ^A (0.10)	96.86 ^A (0.07)	98.84 ^C (0.06)	97.85 ^B (0.07)
Fines (%)	0.25 ^B (0.01)	0.19 ^A (0.01)	0.14 ^A (0.01)	0.18 ^A (0.01)
LHV (MJ kg⁻¹)	18.04 ^B (0.05)	17.64 ^A (0.02)	17.84 ^A (0.03)	18.09 ^B (0.05)
HHV (MJ kg⁻¹)	19.40 ^B (0.05)	19.00 ^A (0.02)	19.19 ^A (0.02)	19.45 ^B (0.05)
NHV (MJ kg⁻¹)	17.60 ^B (0.41)	17.40 ^A (0.38)	17.60 ^B (0.39)	17.90 ^C (0.43)
NED (GJ m⁻³)	10.64 ^A (0.19)	10.72 ^A (0.21)	12.22 ^C (0.26)	11.32 ^B (0.29)

B. Density = Bulk density; LHV = lower heating value; HHV = higher heating value; NHV = net heating value; NED = net energy density; Different letters (row) indicate significant differences (Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$); () = standard deviation.

The energy values (LHV, HHV, NHV and NED) differed significantly between species (Table 3.3). The NHV of *Miscanthus* pellets was the lowest (16.66 MJ kg⁻¹), possibly as a result of the high ash content (2.67%). *Pinus* pellets had the highest NHV (17.13 MJ kg⁻¹), which was favored by the high percentage of lignin, which increased the energy value. The NHV values were 17.11 and 16.45 MJ kg⁻¹ for *Paulownia* and *Eucalyptus* respectively. The values for eucalypt and pine are similar to previously reported values (Protásio *et al.*, 2013).

The percentage of volatile matter was positively correlated with extractives and the percentage of lignin (Figure 3.2). Thus, as the percentage of lignin and extractives increased, the volatile matter also increased. A stronger relationship between these parameters therefore results enhanced combustion performance. The pellets will therefore require a lower ignition temperature, have a shorter oxidation time, and will be more combustible (Moon *et al.*, 2013). Thus, increasing the values of these three parameters will help to produce a biofuel of higher quality.

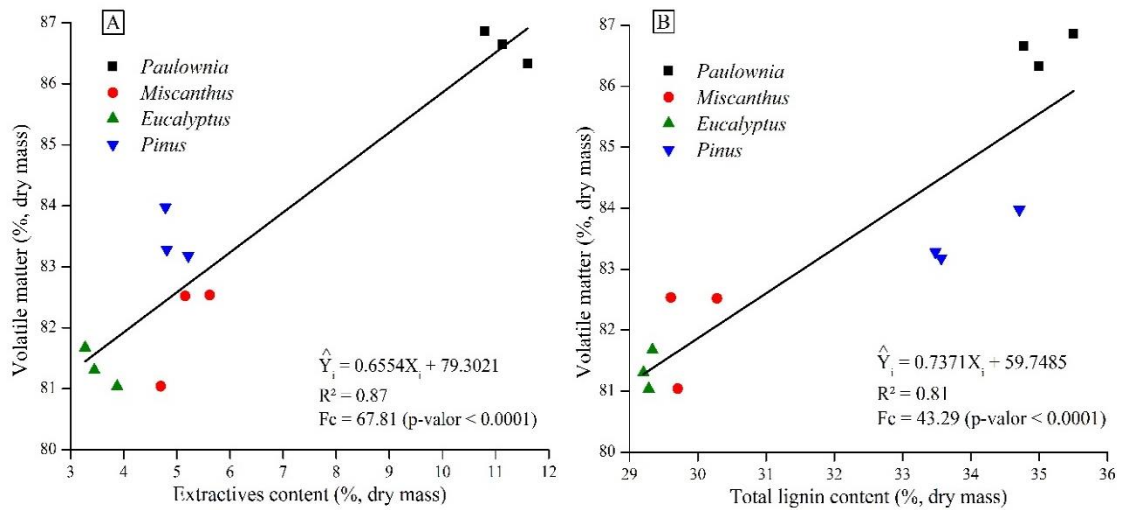


Figure 3.2. (A) Correlations between volatile, extractives, and (B) total lignin contents of lignocellulosic biomass pellets in Chile.

Finally, NED is an indicator of the energy potential of the pellets in units of energy per volume. Likewise, the energy density of the *Eucalyptus* and *Pinus* pellets was significantly higher (with 11.41 and 10.84 GJ m⁻³, respectively) than for the other species. This is mainly due to the high bulk density of wood pellets. However, the NED value for *Paulownia* pellets was low, as a result of its low bulk density, despite the high NHV. According to Obernberger & Thek (2010), the of pellets capacity required for transport and storage decreases as NED increase, which is why this parameter is particularly importance, especially for economic reasons. For example, *Pinus* pellets store 16% more energy than *Miscanthus* pellets for the same volume, a clear advantage for storage and logistics.

3.4.3. Correlations between the chemical characteristics of biomass and energy characteristics of pellets

The results indicate that the HHV of the pellets is closely correlated with the lignin and ash contents. Lignin is an important parameter in energy production, and as the lignin content increased, the heating value of the biofuel also increased significantly (Figure 3.3A). The valley that occurs in the curve of lignin and HHV content is due to the higher ash content of *Miscanthus* that directly affected the calorific value. Therefore, higher lignin values are desirable for pellet production. The relationship between lignin and HHV was also observed by Silva *et al.* (2020) with values similar to those obtained in the present study.

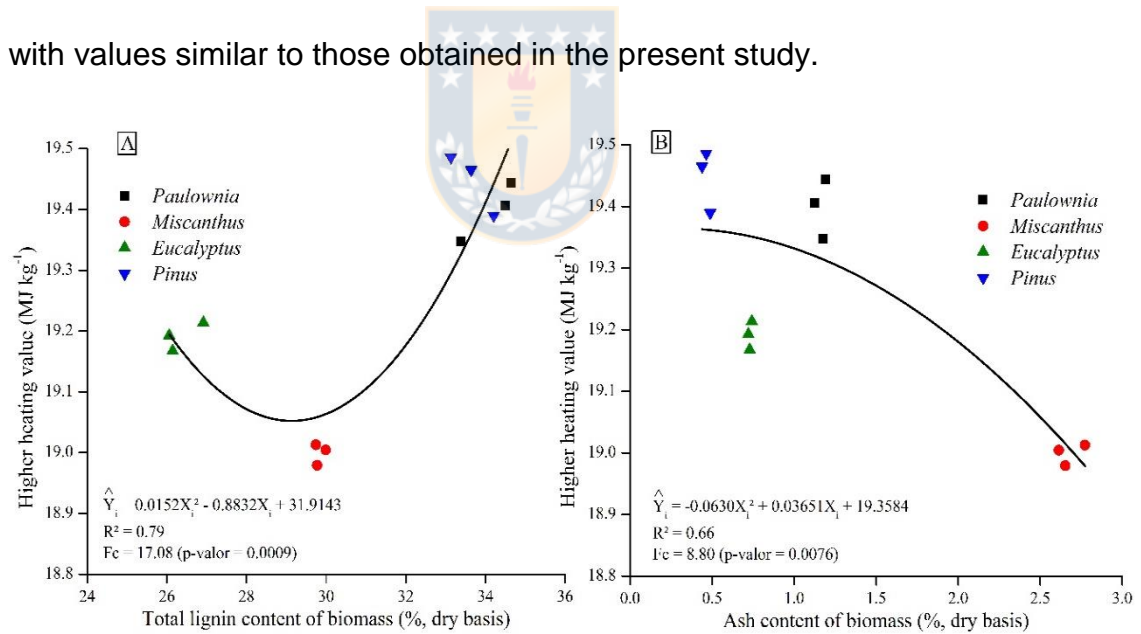


Figure 3.3. Correlations between chemical characteristics of biomass, lignin (A), and ash (B), and the energetic characteristics of pellets (HHV).

The ash content and HHV of the pellets were negatively related. Ash had a different effect than lignin, as it reduced the heating value of the biofuel. As the ash content increased, the HHV of the pellets decreased and thus reduced the

quality, making it less attractive and competitive than other fuels (Figure 3.3B). On the other hand, *Paulownia* and *Pinus* biomass (Figure 3.4) yielded the highest values of lignin, extractives and carbon, and therefore, pellets with higher HHV. The lignocellulosic biomass, with HHV values ≥ 19.40 MJ kg⁻¹, extractive and lignin contents $\geq 40\%$, and carbon content $\geq 47\%$, are more suitable for energy use and have a positive impact on the biofuel quality. These two components (extractives and lignin) are essential for energy purposes as they play an important role in increasing the calorific value of biomass. The higher values of extractives associated with lignin thus help to improve the calorific value of the different types of biomass under study, as reflected in the HHV of the pellets.

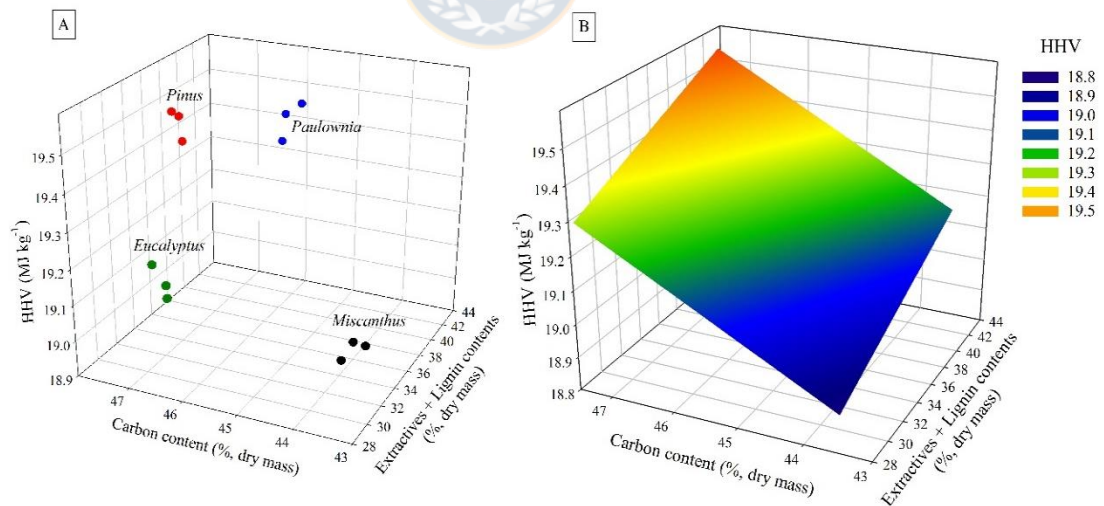


Figure 3.4. A) Higher heating value (HHV) of pellets and extractives (Ext), total lignin (TL) and carbon (C) contents of biomasses. B) Correlation between higher heating value (HHV), total lignin content (TL) and carbon content (C), where: $HHV = 14.200665 + 0.016128(Ext + LT) + 0.097391C$, $R^2 = 0.97$, $F_{calculated} = 131.4$, $p\text{-value} \leq 0.0001$.

Carbon and HHV were positively correlated (Figure 3.5A). Previous studies have reported that as carbon increases the heating value also increases, and the resulting biofuel has greater thermal stability (Protásio *et al.*, 2015). Our findings indicate that as the carbon content increases, HHV consequently increases, as also observed by Pereira (2014). By contrast, oxygen and HHV were negatively related (Figure 3.5B), which is undesirable, as this reduces the heating value and the quality of the pellets during combustion. The findings of this study are similar to those reported by Carroll & Finnan (2012). Similar results were observed for chlorine (Figure 3.6A), as noted by the negative correlation. Chlorine content is extremely important because it reduces the HHV and can lead to corrosion of the equipment (Keipi *et al.*, 2014), which may be a key consideration for excluding a species with energy potential. On the other hand, carbon and FVI2 were positively related (Figure 3.6B), which is important for increasing calorific value.

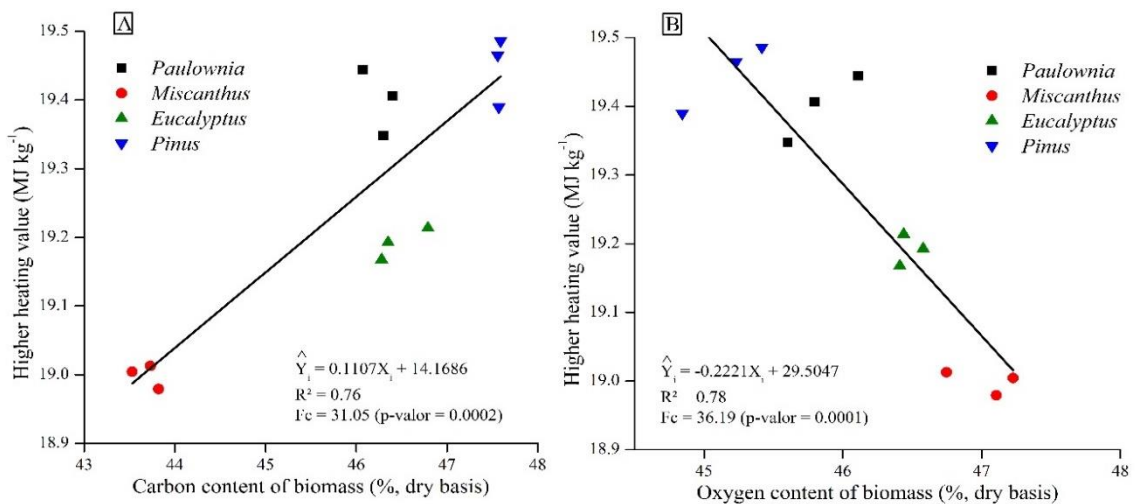


Figure 3.5. Correlations between chemical characteristics of biomass, carbon (A) and oxygen (B) and the energetic characteristics of pellets (HHV).

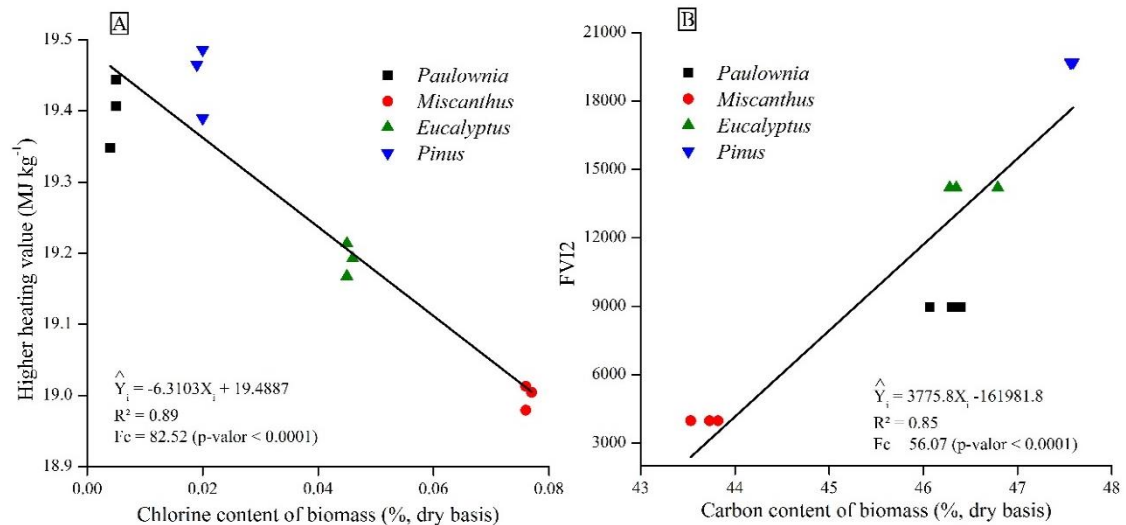


Figure 3.6. Correlations between chemical characteristics of biomass, chlorine (A) and carbon (B) and the energy characteristics of *pellets* (HHV and FVI2).

The properties of raw biomass directly affect the pellet quality, and use of species with good chemical characteristics to produce pellets for energy purposes is thus recommended in order to ensure high quality a biofuel, as well as for satisfying international marketing standards.

3.4.4. FUEL INDEX (FUEL VALUE INDEX - FVI)

The suitability of biomass for energy purposes was determined by considering four factors: HHV, MC, BD and AC, within the two alternative versions of the fuel value index (FVI₁ and FVI₂) (Cardoso *et al.*, 2015). The lowest values of both FVI₁ and FVI₂ corresponded to *Miscanthus* (Table 3.4). This can be explained by the higher ash and moisture contents of *Miscanthus*, which as mentioned, are undesirable parameters for energy use. However, the values are similar to or even higher than the values reported for other non-timber species

(Sadiku *et al.*, 2016). The regulations for biofuels made from non-timber species are more flexible. Thus, the findings are positive, as this species could be used in the same way as currently used species, due to its potential for energy use.

Table 3.4. Higher heating value (HHV), moisture content (MC), bulk density (BD), ash content (AC), fuel value index (FVI), and ranking of four species on the basis of FVI.

Biofuel	HHV	MC	BD	AC	FVI ₁	FVI ₂	Ranking Based of FVI ₁
<i>Paulownia</i> biomass	17.35 ^B (0.14)	5.15 ^A (0.04)	214.16 ^B (1.94)	1.16 ^D (0.03)	619.5 ^{AB} (0.14)	3193.4 ^B (0.14)	7
<i>Paulownia</i> pellets	19.40 ^{FG} (0.04)	8.04 ^B (0.03)	604.29 ^E (1.46)	1.31 ^D (0.09)	1112.6 ^B (0.25)	8943.0 ^D (0.64)	4
<i>Miscanthus</i> biomass	16.91 ^A (0.12)	5.51 ^A (0.09)	123.53 ^A (0.93)	2.68 ^E (0.08)	141.5 ^A (0.46)	779.5 ^A (0.03)	8
<i>Miscanthus</i> pellets	19.00 ^E (0.15)	8.01 ^B (0.10)	615.00 ^F (1.50)	2.94 ^F (0.07)	497.0 ^{AB} (0.48)	3980.2 ^B (0.27)	6
<i>Eucalyptus</i> biomass	18.12 ^E (0.11)	7.40 ^B (0.21)	226.50 ^C (1.02)	0.73 ^B (0.01)	758.6 ^{AB} (0.61)	5614.8 ^C (0.34)	5
<i>Eucalyptus</i> pellets	19.19 ^{EF} (0.02)	4.62 ^A (0.91)	693.40 ^H (0.70)	0.94 ^C (0.02)	3070.5 ^C (0.78)	14198.0 ^E (0.81)	3
<i>Pinus</i> biomass	18.65 ^D (0.08)	5.47 ^A (0.36)	430.28 ^D (1.07)	0.46 ^A (0.02)	3169.7 ^C (0.81)	17323.2 ^F (0.91)	2
<i>Pinus</i> pellets	19.45 ^G (0.05)	5.54 ^A (0.57)	633.17 ^G (1.27)	0.63 ^B (0.03)	3552.4 ^C (1.02)	19689.5 ^G (1.02)	1

() = standard deviation; HHV = higher heating value; MC. (dry base) = moisture content; BD = bulk density; AC = ash content; FVI₁ = Fuel value index (with moisture); FVI₂ = Fuel value index (Without humidity); Different letters (column) indicate significant differences (Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$).

The *Pinus* pellets differed significantly from the pellets made from the other three species and yielded the highest FVI values. This result was expected as pellets are currently manufactured with this species precisely because of its favourable properties. In this case, in relation to the FVI₁ index, similar results were obtained for *Eucalyptus* and *Pinus*, considered potentially useful for pellet production. Wood biomass generally has more suitable properties for energy

production than herbaceous biomass (Garcia *et al.*, 2019), because grasses have higher ash contents and lower density, which affect the heating value of the biofuel.

The highest FVI₂ value corresponded to the pine pellets, which had the highest HHV and low MC and AC values. This was reflected in both indexes, so that pine pellets obtained the top ranking. However, the values obtained for the first three species are quite similar. The values obtained for eucalyptus pellets are two times higher than the values reported by Díez & Pérez (2017).

The FVI values for all four species were generally adequate for pellet production. Therefore, *Paulownia*, *Miscanthus* and *Eucalyptus* could all be considered for inclusion in energy plantations, thus extending the range of species used to make pellets (in addition to *Pinus*).

3.4.5. Microstructure and distribution of lignin in the pellets

Strength is one of the most important properties in pellet production, as structure and compaction will affect the toughness of the biofuel as a porous material. A good understanding of the structure, its compounds, and the distribution of lignin is therefore essential to help understand the mechanical performance (Soltan *et al.*, 2017).

The diameter of the pellets (10 mm) produced in this study possibly resulted in better compaction than more commonly used diameter (6 mm), as noted by Muñoz & Cancino (2014a), in a study in which *Miscanthus* did not

compact very well. The performance and compaction yield were higher in the present than in the aforementioned study, despite the low percentage of lignin in the biomass.

The surface quality of the pellet (cracks and irregularities) tend to be related to two factors: (a) the moisture content of the material before pelletizing (Theerarattananon *et al.*, 2011) and (b) the size and distribution of pellet particles (Hamid *et al.*, 2020). In some types of biomass, the moisture content of the material during pelletizing helps to strengthen the binding between particles. However, when the moisture content is not adequate (either too low or too high), the capillary attraction of the particles decreases, resulting in weak bonds in the pellet structure and in surface cracks and poor compaction. Thicker samples tend to produce less durable pellets with cracks and surface irregularities (Payme, 1978). Thus, the use of finely ground, medium-sized particles is essential to guarantee good quality pellets. Determining quality on the basis of SEM images revealed the presence of cracks and uncracked (clear) areas (Table 3.5), as well as surface irregularities (Figure 3.7).

Table 3.5. Characteristics of the parameters of cracks and non-cracked (clear areas)

Agricultural and forestry biomass	Cracks/mm	Non-cracked areas/mm²
<i>Paulownia</i>	4.12 ^{AB} (0.01)	8.12 ^B (0.02)
<i>Miscanthus</i>	2.50 ^C (0.01)	6.28 ^C (0.01)
<i>Eucalyptus</i>	5.34 ^A (0.01)	2.24 ^D (0.02)
<i>Pinus</i>	0.67 ^D (0.01)	11.02 ^A (0.01)

Different letters (column) indicate significant differences (Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$).

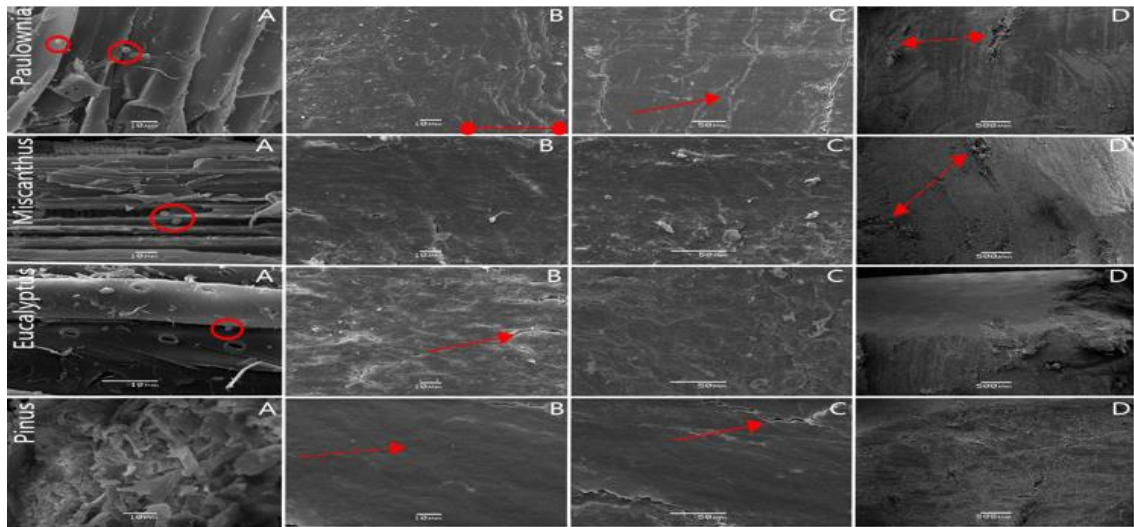


Figure 3.7. Microscopic images of sweeps of the raw species and the cross section in pellets. ●—● Compaction zone, —→ Crack zone, ←—→ Irregularities on the surface, and - - - → non-cracked (clear) zone.

Evaluation of these three aspects in each of the species studied revealed that the proportion of cracks was lowest in the *Pinus* and *Miscanthus* pellets. On the other hand, the *Eucalyptus* pellets had a greater number of cracks, with statistically significant differences between the three species (see Figure 3.8).

The surface cracks consist of openings between the compacted layers of the pellets (Figure 3.7 - *Paulownia* B). These cracks are produced by abrasion, which tends to eliminate dust and fine material from the surface of the pellet and occurs as a consequence of the manufacturing process (granulation and cooling), storage or compaction, or movement during transport (Oveisi *et al.*, 2013).

The pellets made from the 4 species differed significantly in relation to the percentage of uncracked (clear) area. This can be attributed to differences in the proportion of lignin causing segmentation of the particles. The *Pinus* pellets are more compact because of the high percentage of lignin and the consequently

higher proportion of areas without cracks. The opposite was true for *Eucalyptus*, which despite having the second highest percentage of lignin after *Paulownia*, had the highest proportion of cracks. This is due to the density of the timber, which makes it difficult to pelletize. The *Miscanthus* and *Eucalyptus* biomass had <30% lignin and the lowest proportion of uncracked area/mm² values. The proportion of lignin was > 33% in both *Paulownia* and *Pinus* and these also had higher proportions of uncracked areas/mm².

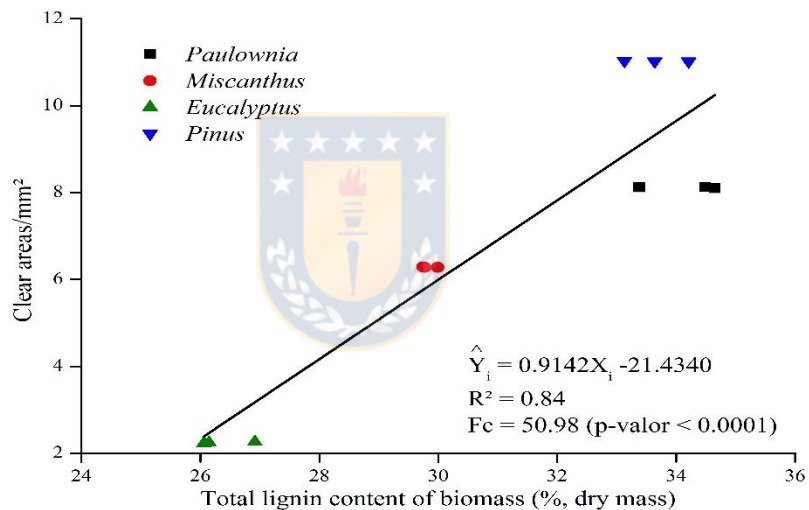


Figure 3.8. Relation between clear areas in the pellets and total lignin content, where (*) - significant at a 1% significance level.

The white or clear areas in the images of the four species represent high density regions (Figure 3.7). These areas are the product of variations in the anatomical structure of each species and the particle size. For example, *Miscanthus* has a high concentration of fibres in the outer layers of the stem, which increases the density from the inner part to the outer part, as observed in bamboo (Zhaohui *et al.*, 2004). In *Pinus*, the anatomical structure varies at the

nodes and internodes. The variation in the anatomical structure of the species and the presence of denser areas both result in a random distribution of lignin in some parts of the pellet. This, in turn, results in an increase in the density in some regions, which hinders compaction, leading to the formation of cracks in all the species studied. These results are similar to those reported by Tenorio *et al.* (2015) in pellets of different species.

The results regarding the durability of the pellets (Table 3.3) show that the particle size of the biofuel of the studied species is responsible for the observed variations in the density profile in both the longitudinal and transverse directions (Mani *et al.*, 2003). In this regard, some studies suggest that smaller particles result in denser granules. This was also reflected in this study, in which raw biomass material of particle size 4mm and pellets of diameter 10mm were analyzed. The smaller particles may explain the smaller number of uncracked zones resulting from the greater durability of the pellets. However, particle size heterogeneity leads to variation in density (Serrano *et al.*, 2011), thus resulting in less durable pellets and larger numbers of cracked areas.

The uncracked area was positively correlated with the lignin content (Figure 3.8). Lignin plays an important role in the compaction of lignocellulosic biomasses for producing pellets and is responsible for the internal cohesion between the particles, which are reorganized and naturally bound on reaching the glass transition temperature (Garcia *et al.*, 2016). Lignin is a fundamental parameter in both the selection of lignocellulosic materials for energy production

and for pellet segmentation. A higher percentage of lignin will, thus, result in greater compaction and less cracking. This will lead to production of higher quality pellets with lower percentages of fines after transportation.

The CLSM images of the pellets made from the four species were evaluated for lignin distribution (Figure 3.9). Because lignin is a phenolic macromolecule formed from the dehydrogenation of phenylpropanes, irradiation with ultraviolet light enables determination of its presence and distribution in fibres (Fengel & Wegener, 1984). However, fluorescent spheres corresponding to microspheres were also detected on the outside and inside of the fibres.

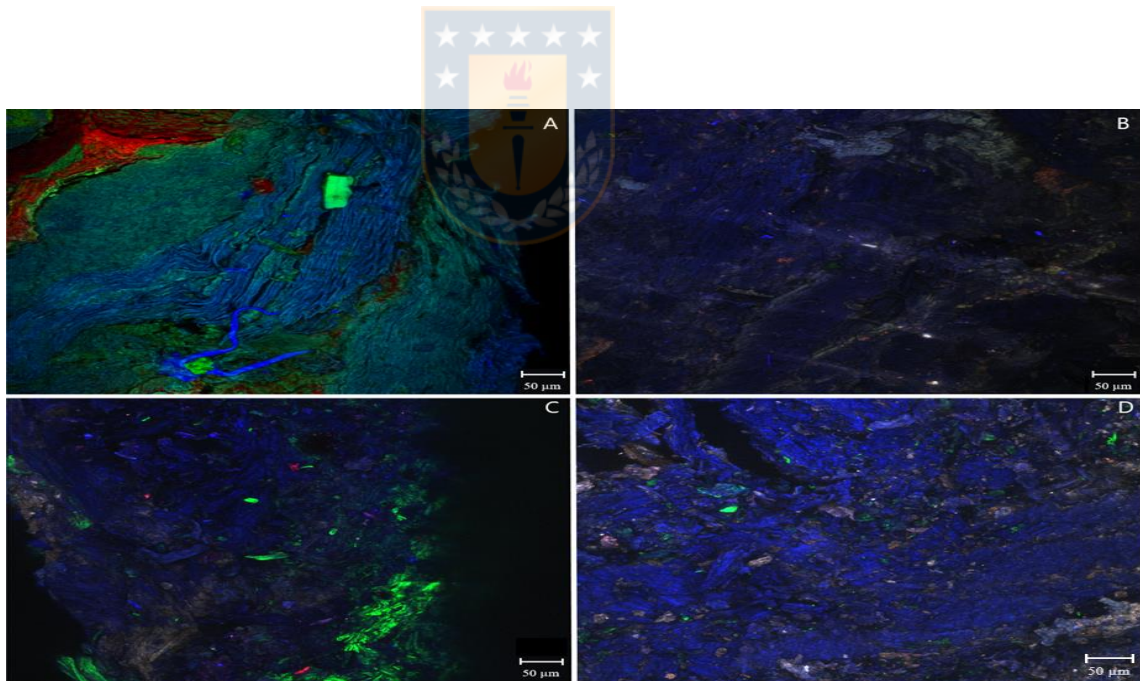


Figure 3.9. Lignin distribution in the cross section of the pellets observed by confocal fluorescence microscopy: A – *Paulownia*; B – *Miscanthus*; C – *Eucalyptus* and D – *Pinus*.

The above helps explain the compaction or densification of species, as lignin is a complex component that is distributed differently in different types of biomass. This can significantly influence densification and affect mechanical parameters such as durability. In some cases, these spheres can be seen on the inside of the fibres (Figure 3.9A), and in others, it is present on the outside, which can be very important during compaction of the pellets. However, the spheres were observed mainly inside the fibres, as in *Miscanthus* (Figure 3.9B). The opposite was observed in *Eucalyptus*, in which the highest percentage of lignin spheres were observed on the external areas; however, this does not reflect a higher proportion of lignin. In this regard, higher fluorescence was observed due to the presence of lignin (Figure 3.9C), which significantly influenced the durability of the pellets made from this species. A higher percentage of lignin spheres on the external portion aided particle bonding, resulting in greater compaction and durability. *Pinus* and *Paulownia* contained more lignin than the other species and also a more suitable distribution of lignin, which was reflected in the durability and the lower percentage of cracks.

Pinus is a very useful material because of the lower proportion of cracks and also because of other characteristics. The microscopic techniques helped to clarify the morphology of the pellets and complement the chemical information. Consideration of the anatomical parameters of biomass can ensure production of an excellent biofuel quality, which will also comply with international standards for transportation and marketing for energy purposes.

3.4.6. Quality of wood and non-woody pellets for energetic use, in accordance with international standards

All pellets fulfilled the criteria established by the German international specifications (Deutsches Institut für Normung: DIN) (Table 3.6). Regarding the S content, the *Miscanthus* pellets surpassed the limit for domestic use, but were classified as suitable for use on an industrial scale. Cl content is another important parameter, indicating that only *Pinus* and *Paulownia* pellets are suitable for domestic use and *Miscanthus* and *Eucalyptus* are acceptable for industrial use. The low mechanical durability of the *Paulownia* and *Miscanthus* pellets can hinder their use destined to the European market. This may be a challenge for the pellet sector in Chile and other countries that manufacture pellets from non-woody species



Table 3.6. Pellet properties and production specification for domestic and industrial use.

Parameter	Standard Domestic use ^a			Standard Industrial use ^b		Results				
	A1	A2	B	A	B	<i>Paulownia</i> Pellets	<i>Miscanthus</i> Pellets	<i>Eucalyptus</i> Pellets	<i>Pinus</i> Pellets	Wood pellet ^c
Diameter (D) and Length (L)	D: 6 ± 1; 8 ± 1			D: 6–25;						D: 6.20 ± 01
	L: 3.15 < L ≤ 40			L: 3.15 < L ≤ 40						L: 15.5 ± 3.0
				D: 12–25;						
				L: 3.15 < L ≤ 50						
Moisture (dry base)	<10			≤12	≤15	8.01	8.01	5.47	5.55	6.31
Extractives (%)						5.16	5.16	3.53	4.93	
Lignin (%)						29.9	29.9	29.3	33.9	
Carbon (%)						44.3	44.3	45.9	47.6	
Hydrogen (%)						5.9	5.9	6.02	6.07	
Nitrogen (%)	0.30	0.50	1.0	≤1.5	≤2.0	0.1	0.1	0.19	0.47	<0.2
Oxygen (%)						46.6	46.6	46.77	44.94	
Volatile (%)						82.2	82.2	81.34	83.48	
Fixed carbon (%)						14.8	14.8	17.7	15.7	
Holocellulose						63.6	63.6	66.3	60.3	
Sulfur (%)	0.04	0.05	0.05	≤0.2	≤0.3	0.02	0.12	0.02	0.02	0.07
Ash (%)	0.7	1.02	2.0	≤6	≤10	1.3	2.6	0.93	0.62	0.42
Chlorine (%)	0.02	0.02	0.03	≤0.1	≤0.3	0.008	0.088	0.048	0.019	0.08
bulk density (kg·m ⁻³)	≥600					615	615	693.4	633.17	710.02
Mechanical durability (%)	≥97.5			≥97.5 ^d	≥96.0 ^d	96.25	96.86	98.84	97.85	98.30
Fines (%)	≤1					0.19	0.19	0.14	0.18	0.56
LHV (MJ kg ⁻¹)						17.64	17.64	17.84	18.09	
HHV (MJ kg ⁻¹)						19	19	19.19	19.45	
NHV (MJ kg ⁻¹)	≥16.5					17.4	17.4	17.6	17.9	17.21
NED (GJ m ⁻³)						10.72	10.72	12.22	11.32	

^aAdapted from EN 17225-1. Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets.

^bAdapted from EN 17225-6. Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody *pellet*.

^cProperties of wood pellets commercialized in Chile.

^dvalues for non-woody pellets

Several studies have characterized pellet biofuels, produced both from woody and non-woody biomass, in e.g. Brazil (Pegoretti *et al.*, 2020), Spain (Garcia *et al.*, 2019), Mexico (Ríos-Badrán *et al.*, 2020), Poland (Zawiślak *et al.*, 2020), Pakistan (Iftikhar *et al.*, 2019), China (Xia *et al.*, 2019) and Chile (Azócar *et al.*, 2019). Studies of the use of different types of biomass grown in Chile to produce pellets are scarce, especially regarding the effect of the lignin distribution and the microscopic structure on the physicochemical and mechanical properties of the pellets. Considering aspects such as the percentage, composition and distribution of lignin in the biomass cell wall is important, as these parameters can influence the appearance of fissures in the pellets. The fissures can in turn decrease mechanical durability and increase the generation of fines during transport, as pellets with a higher proportion of cracked areas will be more friable and of poorer quality. Addressing these factors will directly influence the production and durability of the material and will also affect the costs associated with marketing. The study findings thus illustrate the need to increase the amount lignocellulosic raw materials grown in Chile for energy purposes.

Finally, the different types of biomass (*Paulownia*, *Miscanthus*, *Eucalyptus*, and *Pinus*) are potentially valuable for manufacturing pellets and their use to produce thermal energy. In addition, microscopic methods can be used to analyze the biomass of different timber and non-timber species to evaluate whether they are suitable for energy production. Although the microscopic techniques are not standardized, they can be used to determine quality in relation to pellet

production. Likewise, further tests can be conducted with other species to provide information about potential pellet quality.

3.5. CONCLUSIONS

The study findings show that the properties of forest biomass (*Pinus* and *Eucalyptus*) were more suitable for bioenergy (pellet) production than those of non-woody biomass (*Paulownia* and *Miscanthus*).

The main limitations of *Eucalyptus* biomass were the Cl and N contents, while *Paulownia* biomass was mainly limited by bulk density and durability, and *Miscanthus* yielded poorer results for a number of parameters (ash, S, Cl, bulk density, durability of heating value).

Overall, *Pinus* pellets were classified with the highest fuel value index, even when produced from wood, bark and branches of young trees. Microscopic analysis (SEM and CLSM) proved to be an important tool for evaluating biomass compaction from an anatomical perspective, providing information on the distribution of lignin.

The uncracked area in the pellets was positively correlated with lignin content. The combined consideration of physical, chemical and mechanical properties provides a solid basis for designing pelletization processes, pretreatments and the possible use of mixtures of raw materials.

4. CAPITULO IV. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS DE TORREFACCIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE CUATRO ESPECIES CON POTENCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA

RESUMEN

La torrefacción de biomásas permite mejorar algunas características consideradas indeseables para el uso energético, como el bajo poder calorífico, alta humedad y alta higroscopicidad. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos de diferentes temperatura y tiempos de torrefacción sobre las propiedades físicas, químicas y energéticas de *pellets* producidos desde cuatro especies (*Paulownia elongata x fortunei*, *Miscanthus x giganteus*, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*) para uso en la producción de energía térmica. Se consideraron tres temperaturas (210, 250 y 290°C), tres tiempos de tratamiento (10, 20 y 30 min) y velocidad de calentamiento de 4°C min⁻¹. La mayoría de las propiedades se ajustaron a lo establecido por las normas internacionales (DIN EN 14961-2) de calidad de *pellets*. Se observó que a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de tratamiento se obtienen los mejores resultados sobre las características evaluadas. La humedad disminuyó el 95% del material *in natura* al tratamiento por 290°C/30 min. El poder calorífico líquido (PCL) incrementó un 30% en todas las especies bajos las mismas condiciones de torrefacción. Otro parámetro que disminuyó fue el material volátil (MV) entorno del 12%, importante ya que disminuye la combustibilidad en el almacenaje. También se determinó que el porcentaje de cloro en los *pellets* torrefactados va

disminuyendo en relación al aumento de temperatura y tiempo de tratamiento. En el caso de *E. nitens*, luego de la torrefacción se observó que con el tratamiento por 290°C/30 min se redujo en hasta 50% el cloro en los *pellets* torrefactados, llegando a un valor de 0,02% de cloro, cumpliendo con la norma de calidad. Se concluye que el uso de la técnica de torrefacción resultó ser adecuada para aumentar la calidad y homogeneidad del biocombustible como producto que cumple normas internacionales para *pellets*.

Palabras clave: biomasa lignocelulósica; densificación; *pellets*; torrefacción; tratamiento térmico.



4.1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fuentes de energía para satisfacer el consumo humano sigue creciendo. Actualmente, la principal fuente de energía en el mundo son los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), aunque no se sabe cuánto de estos combustibles hay disponible, se acepta que se están agotando o volviendo más difícil y costosa su extracción, además de ser considerados como no renovables. La principal consecuencia asociada al uso de los combustibles fósiles es la liberación del dióxido de carbono a la atmosfera, razón principal del calentamiento global (McKendry, 2002). Debido a estas circunstancias, la búsqueda de otras formas de fuentes de energías renovables es razonable.

Una opción viable, es la fabricación de *pellets* a través de biomasa lignocelulósica, la cual es empleada en la generación de energía térmica para la calefacción de residencias o el uso en procesos industriales, siendo su auge mayormente en Europa y América del Norte. A pesar del incremento de la calidad energética, este biocombustible aún mantiene algunas características de la biomasa de la cual se originaron, como por ejemplo, bajo poder calorífico en relación a los combustibles fósiles y alta higroscopicidad, propiedades que son indeseables para la generación de energía térmica (Lam *et al.*, 2012).

La producción de *pellets* en Chile ha ido en aumento, en el 2018 se fabricaban 121 mil toneladas (FAO, 2018). Actualmente, existen más empresas fabricantes (aproximadamente 30 plantas de producción) y se producen cerca de 200 mil toneladas de *pellets* anualmente ubicadas en el centro-sur de Chile donde el aserrín de madera de pino se usa comúnmente como materia prima. Existen diferentes opciones de biomasa lignocelulósicas, entre ellas, las leñosas y las herbáceas, algunas son estudiadas en el presente trabajo como son: *Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus*, *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata*.

Una medida para disminuir los problemas de contaminación y mejorar las características de los *pellets* es mediante el proceso térmico denominado torrefacción, que es básicamente una pirolisis parcial de la biomasa en un ambiente con ausencia de oxígeno. Este proceso se realiza en temperaturas entre los 200 – 300°C y en tiempos cortos de residencia, lo que promueve la degradación de los compuestos menos energéticos y más hidrófilos que posee

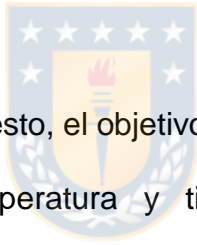
la biomasa, pudiendo de esta forma obtener un aumento de la densidad energética (Nhuchhen *et al.*, 2014). Los mismos autores definen que este proceso de torrefacción puede ser dividido en cuatro etapas: 1) el secado, donde se retira el agua libre presente en la madera; 2) remoción del agua de constitución presente en los enlaces y también algunos hidrocarbonatos; 3) la torrefacción propiamente con la liberación de partes de los compuestos volátiles y 4) enfriamiento a temperatura ambiente del material torrefactado.

Los *pellets* torrefactados pueden ser tratados térmicamente mediante dos procesos: por medio de la torrefacción de las partículas y la posterior peletización, y una segunda vía que consiste en peletizar y posteriormente someterlos a la torrefacción (Peng *et al.*, 2015). Para efectos de esta investigación, fue empleada la segunda opción de tratamiento, para ello los *pellets* deben poseer una alta resistencia mecánica para que soporten el proceso sin ser desintegrados y no generar finos, esto considerando que algunos procesos o equipos mantienen a la biomasa o los *pellets* en constante movimiento. Esta opción también implica un menor costo del proceso de producción, ya que no requiere acondicionamiento con vapor para facilitar la peletización (Ghiasi *et al.*, 2014).

En la torrefacción el control del tiempo y la temperatura es enormemente importante para obtener *pellets* torrefactados de buena calidad, aunque la determinación continua de algunas propiedades durante el proceso es inviable debido al tiempo exigido y el costo de los análisis. De allí que la evaluación de las propiedades del material torrefactado como el poder calorífico, la densidad a

granel o la higroscopicidad, permiten predecir el potencial para el uso energético y ayudar en la toma de decisión de los parámetros de torrefacción.

Por otro lado, las variaciones causadas por la torrefacción sobre las propiedades energéticas del biocombustible pueden correlacionarse con cambios en su patrón de color. De acuerdo a Zanuncio *et al.* (2014a), el primer efecto de la torrefacción es el oscurecimiento que se vuelve progresivo al aumentar el tiempo o la temperatura, característica que quizás a la vista del consumidor es poco atractivo. Sin embargo, son mayores los beneficios que hacen que el empleo de este proceso térmico sea promisorio.



De acuerdo a lo expuesto, el objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos de diferentes temperatura y tiempos de torrefactado sobre las propiedades físicas, químicas y energéticas de *pellets* fabricados con cuatro especies de biomasa para uso en la producción de energía térmica, analizando los parámetros de calidad bajo la norma internacional DIN EN 14961-2.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Biomasa

El material clonal de *Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus* utilizado proviene de plantaciones dendroenergéticas realizadas durante el desarrollo de un proyecto (FONDEF B09I 1008) (Muñoz & Cancino, 2014b; Muñoz & Cancino 2014a) localizadas en Concepción y Angol

respectivamente. Por su parte, el material de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* proviene de plantíos comerciales de 5 años de edad, ubicados en Concepción y Collipulli, respectivamente (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Ubicación de los ensayos de las especies en estudio

ID	Especies	Ubicación Región	Tipo de biomasa	Humedad (%)	Densidad Madera (kg m ⁻³)	Densidad de plantío
1	<i>Paulownia in natura</i>	Concepción (VIII)	Fuste, ramas y corteza	5.15	289.20	1.000 arb ha ⁻¹
2	<i>Paulownia pellets</i>	Concepción (VIII)	Fuste, ramas y corteza	8.04	---	
3	<i>Miscanthus in natura</i>	Angol (IX)	Planta entera	5.51	249.05	20.000 brotes ha ⁻¹
4	<i>Miscanthus pellets</i>	Angol (IX)	Planta entera	8.01	---	
5	Eucalipto <i>in natura</i>	Collipulli (VIII)	Fuste, ramas y corteza	7.40	491.33	1.100 arb ha ⁻¹
6	Eucalipto <i>pellets</i>	Collipulli (VIII)	Fuste, ramas y corteza	4.62	---	
7	Pino <i>in natura</i>	Concepción (IX)	Fuste, ramas y corteza	5.47	367.35	1.100 arb ha ⁻¹
8	Pino <i>pellets</i>	Concepción (IX)	Fuste, ramas y corteza	4.54	---	

4.2.2. Caracterización de la biomasa

La humedad (base seca) de la biomasa se obtuvo a través de la metodología descrita por la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 14774-1 (2010a). Para la determinación de la composición química y el poder calorífico superior (PCS) de las muestras se empleó la norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* [TAPPI] T 257 cm-85 (1985).

Para la caracterización de la composición química de la biomasa se determinó el contenido de extractivos utilizando la norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* [TAPPI] T 204 cm-97 (1997), el cual fue realizado por extracción de la biomasa con acetona 90% en Soxhlet. El contenido de lignina fue determinado por hidrolisis ácida con H₂SO₄ 72% de acuerdo a Mendonça *et al.* (2008). La determinación del material volátil (MV) se efectuó bajo la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 51720 (2001), para el porcentaje de cenizas (CZ) se utilizó el procedimiento de la *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 14775 (2007) y por diferencia, el carbono fijo (CF). Por su parte, para el porcentaje de cloro se empleó la metodología de la *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 15289 (2011).

La densidad a granel (DG) fue realizada de acuerdo con la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 15103 (2010c). Para determinar el poder calorífico superior (PCS), se utilizó una bomba calorimétrica modelo PARR 6400 mediante el procedimiento de la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 14918 (2010b). El poder calorífico inferior (PCI) fue estimado mediante la fórmula (4.1); donde ambos son calculados en kcal kg⁻¹ y H es el contenido de hidrógeno (% en base seca), de acuerdo a Brand (2010).

$$\text{PCI} = \text{PCS} - (600 \times 9\text{H}) / 100 \quad (4.1)$$

La estimativa del poder calorífico líquido (PCL) fue realizada utilizando la fórmula (4.2); conforme al Anexo E de la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 14918 (2010b) donde U_{bu} se refiere a la humedad en base húmeda.

$$PCL = PCI \times \left[\left(\frac{100 - U_{bu}}{100} \right) \right] - (6 \times U_{bu}) \quad (4.2)$$

Por otro lado, se calculó la densidad energética líquida (DEL) de las biomásas mediante la fórmula (4.3); donde DEL es densidad energética líquida y DG se refiere a densidad a granel.

$$DEL = DG \times PCL \quad (4.3)$$

4.3. PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE *PELLETS*

El peletizado de las biomásas utilizadas para la producción de los *pellets* fue la descrita en la tabla 4.1. El material utilizado poseía una granulometría de 4 mm y una humedad que varió entre 5–9%, excepto eucalipto, que fue peletizado a 12% debido a su alta densidad, dificultando su peletizado. Los *pellets* fueron producidos en una prensa peletizadora de matriz horizontal (KAHL 33-390) con 300 kg h⁻¹ de capacidad nominal. La peletizadora está equipada con un motor de 200 kW (45–60 A) y se empleó una matriz de 10 mm. La caracterización (química, física y energética) de los *pellets* fue mediante las normas descritas en la Sección 2.2.

4.4. TORREFACCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PELLETS

La torrefacción se realizó en una mufla Hobersal marca HD-430 PAD, con una capacidad de almacenamiento de 0,02 m³. Dentro de la mufla se instaló un recipiente de porcelana para limitar la entrada de oxígeno y obtener un torrefactado adecuado. Se usaron aproximadamente 130 g de *pellets* previamente secados en estufa a 103 ± 2°C. Para la torrefacción fueron utilizadas tres temperaturas (210, 250 y 290°C) y tres tiempos (10, 20 y 30 min), definidos mediante pruebas preliminares. Para cada temperatura y tiempo, se realizaron tres repeticiones. La velocidad de calentamiento de la mufla fue de aproximadamente 4°C min⁻¹. Para cada tiempo de torrefacción fue medido el consumo de energía (medidor de luz digital en kW/h) desde el inicio hasta el final del proceso, con el fin de observar el consumo por especie. Al final del proceso, el material fue retirado de la mufla y enfriado en un desecador.

La caracterización (química, física y energética) de los *pellets* fue mediante las normas descritas en la Sección 2.2. También se realizaron análisis de elementos químicos mayoritarios (B, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Fe; Cu, Zn, Mo) de acuerdo a la norma *Deutsches Institut Für Normung* [DIN] EN 15297 (2011b). Adicionalmente, se calculó la pérdida en masa (PM) de cada tratamiento, que se obtuvo dividiendo la masa final de los *pellets* torrefactados entre la masa inicial de los *pellets in natura*, multiplicado por 100. También se calculó el rendimiento masa (RM), que corresponde a la masa final de los *pellets* torrefactados en relación a la masa inicial dado en porcentaje.

También se calculó el rendimiento en energía (RE) dividiendo el PCS de cada tratamiento de los *pellets* torrefactados entre la media del PCS de los *pellets in natura* (kcal kg⁻¹), multiplicado por el rendimiento en masa (RM) de acuerdo a la fórmula 4.4.

$$RE = \frac{PCS_T}{PCS_I} \times RM \quad (4.4)$$

Siendo, PCS_T: poder calorífico superior torrefactado en MJ kg⁻¹ y PCS_I poder calorífico superior *in natura* expresados en MJ kg⁻¹.

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se estableció un delineamiento enteramente casualizado (DIC) para cada propiedad que se cuantificó en cada especie, también fueron calculadas las tendencias centrales de media y dispersión (desviación estándar). A través del test Lilliefors se comprobó la normalidad, y a su vez, se usó test Cochran para comprobar la homogeneidad de las varianzas (ANOVA). Una vez establecidas las diferencias significativas entre especies, se aplicó una comparación de medias a través del test Tukey con 5% de probabilidad, utilizando el software estadístico IBM SPSS (versión 24.0).

4.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.6.1. Valores energéticos de la biomasa *in natura* y *pellets*

Los valores promedios de los poderes caloríficos se muestran en la Tabla 4.2. El poder calorífico inferior (PCI) de los *pellets* presentó un aumento lineal

directamente proporcional con la temperatura final (290°C/30 min) de torrefacción para las cuatro especies.

Tabla 4.2. Valores energéticos de las biomásas y *pellets* según especie.

Tratamientos	PCI (MJ kg ⁻¹)			
	<i>Paulownia</i>	<i>Miscanthus</i>	Eucalipto	Pino
M. in natura	15.99 ^A (0.14)	15.55 ^A (0.13)	16.76 ^A (0.01)	17.30 ^A (0.08)
<i>Pellets</i> (S/T)	17.96 ^B (0.05)	17.60 ^B (0.02)	17.80 ^B (0.02)	18.02 ^C (0.05)
(210°C/ 10 min)	18.12 ^B (0.08)	17.71 ^{BC} (0.11)	17.76 ^B (0.09)	17.66 ^B (0.01)
(210°C/ 20 min)	18.10 ^B (0.06)	17.91 ^{CD} (0.10)	17.79 ^B (0.11)	18.47 ^{CD} (0.06)
(210°C/ 30 min)	18.44 ^{CD} (0.06)	18.09 ^{DE} (0.11)	18.22 ^D (0.11)	19.04 ^E (0.08)
(250°C/ 10 min)	18.17 ^{BC} (0.10)	17.80 ^{BC} (0.10)	18.24 ^D (0.06)	18.56 ^D (0.10)
(250°C/ 20 min)	18.60 ^D (0.11)	18.23 ^E (0.10)	18.49 ^{DE} (0.05)	19.01 ^E (0.02)
(250°C/ 30 min)	18.96 ^E (0.03)	18.30 ^E (0.08)	18.81 ^{EF} (0.06)	19.08 ^E (0.07)
(290°C/ 10 min)	18.22 ^{BC} (0.11)	17.75 ^{BC} (0.06)	18.13 ^{CD} (0.02)	18.05 ^D (0.09)
(290°C/ 20 min)	19.05 ^E (0.11)	18.17 ^{DE} (0.06)	19.08 ^F (0.04)	19.01 ^E (0.03)
(290°C/ 30 min)	21.78 ^F (0.08)	20.00 ^F (0.11)	21.77 ^G (0.15)	22.58 ^F (0.16)
	PCS (MJ kg ⁻¹)			
M. in natura	17.35 ^A (0.14)	16.91 ^A (0.12)	18.12 ^A (0.01)	18.65 ^A (0.09)
<i>Pellets</i> (S/T)	19.39 ^B (0.18)	18.99 ^B (0.12)	19.18 ^{CB} (0.30)	19.44 ^B (0.38)
(210°C/ 10 min)	19.54 ^B (0.08)	19.06 ^B (0.10)	19.13 ^B (0.09)	19.01 ^B (0.02)
(210°C/ 20 min)	19.52 ^B (0.06)	19.26 ^{BC} (0.10)	19.14 ^B (0.10)	19.83 ^{BC} (0.07)
(210°C/ 30 min)	19.84 ^{CD} (0.05)	19.44 ^{CD} (0.10)	19.58 ^E (0.10)	19.86 ^C (0.09)
(250°C/ 10 min)	19.59 ^{BC} (0.09)	19.16 ^B (0.10)	19.59 ^D (0.05)	19.91 ^C (0.10)
(250°C/ 20 min)	20.00 ^D (0.10)	19.58 ^D (0.10)	19.84 ^{EF} (0.05)	20.36 ^D (0.02)
(250°C/ 30 min)	20.34 ^E (0.04)	19.63 ^D (0.07)	20.15 ^G (0.05)	20.40 ^D (0.06)
(290°C/ 10 min)	19.63 ^{BC} (0.12)	19.12 ^B (0.06)	19.49 ^{CD} (0.02)	19.86 ^C (0.09)
(290°C/ 20 min)	20.43 ^E (0.11)	19.51 ^D (0.06)	20.40 ^G (0.04)	20.34 ^D (0.02)
(290°C/ 30 min)	23.06 ^F (0.09)	21.26 ^E (0.11)	23.02 ^H (0.11)	23.74 ^E (0.09)
	PCL (MJ kg ⁻¹)			
M. in natura	15.43 ^A (0.14)	15.37 ^A (0.26)	16.56 ^A (0.35)	17.09 ^A (0.37)
<i>Pellets</i> (S/T)	17.36 ^B (0.19)	17.00 ^B (0.14)	17.06 ^B (0.27)	17.34 ^A (0.35)
(210°C/ 10 min)	17.58 ^B (0.20)	17.46 ^{BC} (0.33)	17.04 ^B (0.32)	17.32 ^B (0.09)
(210°C/ 20 min)	18.05 ^{BC} (0.16)	17.01 ^B (0.12)	17.53 ^{BC} (0.21)	18.48 ^B (0.08)
(210°C/ 30 min)	18.33 ^{CD} (0.21)	17.46 ^{BC} (0.41)	18.05 ^{CDE} (0.05)	18.70 ^B (0.20)
(250°C/ 10 min)	17.92 ^{BC} (0.11)	17.29 ^{BC} (0.36)	17.53 ^{BC} (0.70)	18.30 ^B (0.10)
(250°C/ 20 min)	18.39 ^{CD} (0.32)	18.08 ^C (0.16)	17.96 ^{CD} (0.26)	18.55 ^B (0.13)
(250°C/ 30 min)	18.98 ^E (0.05)	17.61 ^{BC} (0.54)	18.67 ^{DE} (0.03)	18.81 ^B (0.08)
(290°C/ 10 min)	18.08 ^{BC} (0.12)	17.59 ^{BC} (0.13)	17.70 ^{BC} (0.40)	18.28 ^B (0.37)
(290°C/ 20 min)	18.73 ^{DE} (0.023)	17.90 ^C (0.06)	18.89 ^E (0.04)	18.57 ^B (0.35)
(290°C/ 30 min)	21.67 ^F (0.009)	19.69 ^D (0.24)	21.43 ^F (0.07)	21.99 ^C (0.35)

M. in natura = material in natura; *Pellets* (S/T) = *pellets* sin tratamiento térmico; Medias seguidas por la misma letra (en la columna) no difieren entre sí, al 5% de probabilidad por el test Tukey

Los valores promedios obtenidos presentan diferencias significativas entre los tratamientos de las cuatro especies en estudio, si comparamos el material *in natura* y los *pellets* torrefactados con temperatura de 290°C/30 min de residencia, se puede apreciar un aumento del PCI donde la *Paulownia* presenta 36%, 28% para *Miscanthus*, 29% para eucalipto y 30% para pino.

De igual forma sucedió con el PCS, donde *Paulownia* presentó aumento de 32%, *Miscanthus* 25% y, eucalipto y pino 27%. Esto ocurre debido a que cuando se torrefacta a temperaturas cercanas a 300°C, la lignina aumenta proporcionalmente ya que las hemicelulosas son eliminadas influyendo en el aumento del poder calorífico (Nhuchhen *et al.*, 2014). También influye la remoción durante el proceso térmico de los compuestos volátiles ricos en oxígenos y el incremento del porcentaje de carbono (Peng *et al.*, 2013).

El PCS es uno de los principales parámetros a tomar en cuenta a la hora de seleccionar biomásas para el uso energético, por lo que, la torrefacción viene a incrementar su valor de forma significativa. En el estudio se relaciona positivamente el incremento del valor de PCS con el incremento de la temperatura de torrefacción, siendo significativa a temperaturas de 250°C y 290°C. El aumento en el PCS está asociado al incremento de la temperatura, ya que a temperaturas mayores las hemicelulosas son modificadas o se eliminan quedando una mayor concentración de lignina en los *pellets*.

Por consiguiente, si observamos el PCL, que expresa las condiciones reales de uso energético que incluye la humedad de los *pellets* (Figura 4.1), se

aprecia aumento significativo en comparación al material *in natura*. La especie *Paulownia* presenta mayor aumento con 40%, luego *Miscanthus* con 28%, eucalipto 29% y pino 28%. Si se observa los resultados de *Miscanthus* (biomasa no leñosa) y se compara con otros residuos agrícolas se aprecia que los valores de PCL (tratamiento de 210°C/10 min), fueron superiores a los encontrados por Azócar *et al.* (2019) en *Triticum aestivum*, y similares a los encontrados por Pereira (2014) en un estudio sobre caña de azúcar. Los valores de PCL para pino *in natura* y *pellets* torrefactados en temperaturas de 220 y 250°C son similares a los encontrados por Protásio *et al.* (2015) para la especie de pino.

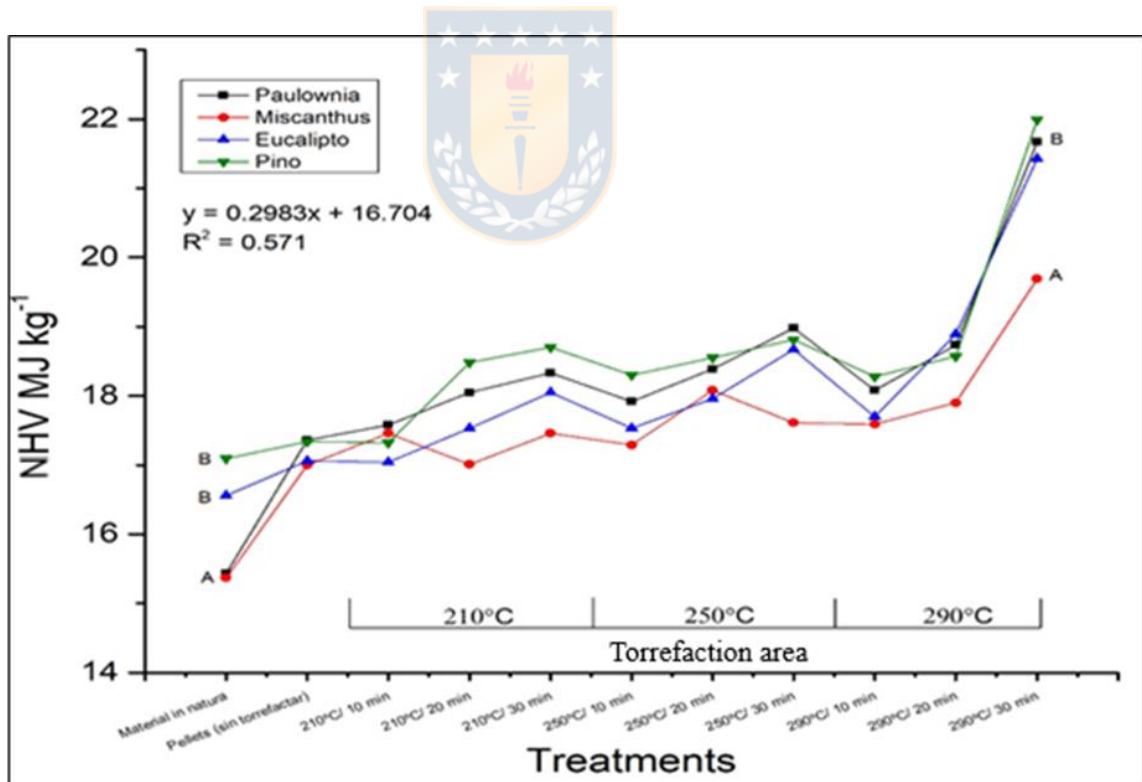


Figura 4.1. Valores promedio de los poderes caloríficos líquidos (PCL) según tratamiento de torrefacción.

Se busca con el proceso de torrefacción valores altos de PCL, es decir, mayor cantidad de energía por unidad de volumen. Los *pellets* torrefactados en las temperaturas más altas (250 y 290°C), también tienen los mayores valores medios energéticos con media de 20% más altos que la biomasa *in natura* (Figura 4.1). Otro aspecto importante a considerar es la cantidad de energía externa que requiere la torrefacción. De acuerdo con Pirraglia *et al.*, (2012), este proceso puede ser hasta un 80% autosustentable, por medio de una recirculación de los gases generados en la producción del calor, mientras que el otro 20% de energía requerida debe ser obtenida mediante una fuente externa. Para ello, se realizó un análisis de consumo de energético (Figura 4.2) en las diferentes temperaturas para demostrar las ventajas y viabilidad económica de este proceso. Se conoce que el gasto energético aumenta con la temperatura del proceso, aunque un correcto análisis debe considerar todos los beneficios que se obtienen con el proceso térmico versus el gasto económico del consumo. En el caso del presente estudio, el mayor consumo (1,53 kWh) fue en la temperatura de 290°C/30 min (consumo diario de 73 kWh), todo esto a escala de laboratorio en una mufla de 0.216 m³. De acuerdo a Pirraglia *et al.* (2012) si se efectúa recuperación y recirculación de los gases se utilizaría el 20% de energía externa reduciendo el costo, permitiendo con ello viabilizar el proceso y, además, posibilitando la obtención de los beneficios que conlleva tener un material hidrófobo y el aumento del poder calorífico de los *pellets* torrefactados.

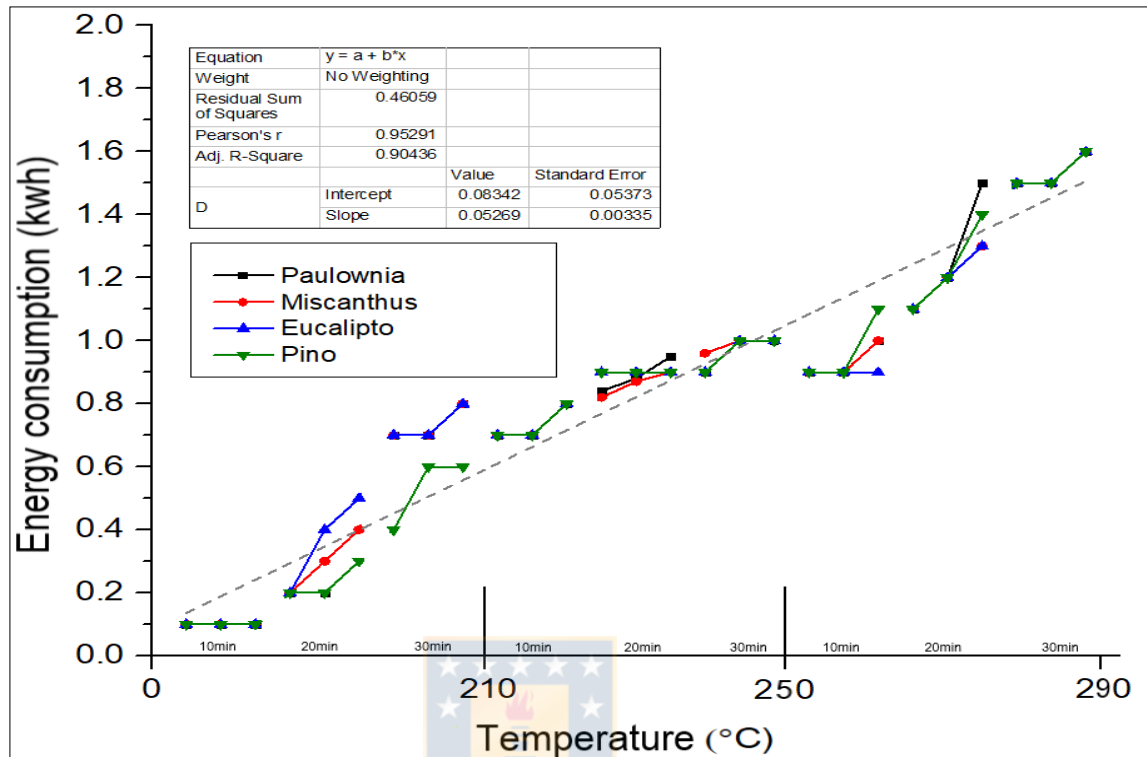


Figura 4.2. Consumo energético (kwh) de los pellets en el proceso de torrefacción.

4.6.2. Análisis de los elementos químicos menores en los pellets torrefactados

Los valores de los elementos menores de los pellets torrefactados cumplieron con los parámetros de calidad de las normas internacionales (Tabla 4.3). Se observó diferencia significativa entre los extremos de temperatura y tiempo (210°C/10 min; 290°C/30 min). Los elementos (B, S, Ca, Cu Zn y Mo) fueron evaluados pero el equipo de laboratorio no fue capaz de observarlos, ya que debajo de 0.05% son considerados como no detectados (ND).

Las diferencias entre los elementos de Na, Mg, Al, P, K, Mn y Fe se debe al incremento de la temperatura, lo cual es una desventaja ya que también

aumenta el porcentaje de cenizas en nuestro combustible, lo cual elevaría el porcentaje de elementos menores en los *pellets* torrefactados. Esto se asocia directamente a la corrosión junto a elementos como K, S, Cl, y Na (Fagerström *et al.*, 2016). Por lo tanto, las temperaturas de torrefacción utilizadas en este estudio serían apropiadas para la producción de *pellets* de las cuatro especies, sin producir problemas operativos en la combustión. Si observamos los *pellets* de las especies de *Paulownia*, *Miscanthus*, y eucalipto en comparación con los de pino, podemos notar que este último posee las mejores características de calidad.

Se han reportado excelentes propiedades para pino, tales como alto PCL (18.90 MJ kg⁻¹) y bajo porcentaje de cenizas (0.3%) y para eucalipto un PCL de 17.45 MJ kg⁻¹ y cenizas de 0.18% (Arteaga-Pérez *et al.*, 2015).

De igual forma, podrían ser utilizadas especies como la *Paulownia* y el *Miscanthus*, ya que poseen gran potencial energético y se adaptan bien a climas mediterráneos (Muñoz & Cancino, 2014b). Por lo tanto, debido al incremento de las cenizas y algunos elementos mayoritarios solo *pellets* de pino torrefactados a la temperatura de 210°C/10 min podrían ser utilizados para uso doméstico de acuerdo a las especificaciones de la norma alemana DINplus.

Tabla 4.3. Análisis de elementos mayoritarios de las cuatro especies torrefactadas

Especie	Te	Ti	Elementos menores (%)						
			Na	Mg	Al	P	K	Mn	Fe
<i>Paulownia elongata x fortunei</i>	210	10	0.09 ^{ABC (0.00)}	0.78 ^{AB (0.01)}	0.11 ^{BC (0.00)}	0.08 ^{A (0.00)}	4.93 ^{AB (0.12)}	ND	0.13 ^{BC (0.00)}
		20	0.08 ^{A (0.00)}	0.69 ^{A (0.02)}	0.09 ^{A (0.00)}	0.07 ^{A (0.00)}	4.20 ^{A (0.53)}	ND	0.11 ^{A (0.00)}
		30	0.08 ^{AB (0.00)}	0.71 ^{A (0.02)}	0.10 ^{AB (0.00)}	0.08 ^{A (0.00)}	4.91 ^{AB (0.71)}	ND	0.13 ^{AB (0.01)}
	250	10	0.09 ^{CD (0.01)}	0.83 ^{B (0.07)}	0.11 ^{BC (0.01)}	0.09 ^{AB (0.00)}	5.49 ^{BC (0.42)}	ND	0.13 ^{B (0.01)}
		20	0.09 ^{BCD (0.00)}	0.79 ^{AB (0.01)}	0.11 ^{AB (0.00)}	0.09 ^{AB (0.00)}	5.18 ^{AB (0.12)}	ND	0.15 ^{CD (0.00)}
		30	0.09 ^{ABC (0.01)}	0.77 ^{AB (0.07)}	0.10 ^{AB (0.01)}	0.08 ^{A (0.00)}	5.11 ^{AB (0.53)}	ND	0.13 ^{AB (0.01)}
	290	10	0.10 ^{D (0.00)}	0.96 ^{C (0.01)}	0.14 ^{D (0.00)}	0.10 ^{B (0.00)}	5.92 ^{BC (0.01)}	ND	0.17 ^{D (0.00)}
		20	0.08 ^{AB (0.00)}	0.75 ^{AB (0.01)}	0.10 ^{AB (0.00)}	0.08 ^{A (0.00)}	4.99 ^{AB (0.08)}	ND	0.14 ^{BC (0.00)}
		30	0.09 ^{BCD (0.00)}	0.97 ^{C (0.01)}	0.12 ^{C (0.00)}	0.10 ^{B (0.00)}	6.50 ^{C (0.01)}	ND	0.21 ^{E (0.00)}
<i>Miscanthus x giganteus</i>	210	10	0.08 ^{BC (0.00)}	0.61 ^{C (0.03)}	0.33 ^{D (0.02)}	ND	1.32 ^{AB (0.06)}	0.06 ^{A (0.00)}	0.38 ^{BC (0.02)}
		20	0.08 ^{C (0.00)}	0.58 ^{AB (0.01)}	0.33 ^{D (0.00)}	ND	1.27 ^{A (0.02)}	0.06 ^{A (0.00)}	0.40 ^{C (0.01)}
		30	0.08 ^{C (0.00)}	0.58 ^{AB (0.01)}	0.34 ^{D (0.00)}	ND	1.36 ^{BC (0.03)}	0.06 ^{A (0.00)}	0.37 ^{B (0.01)}
	250	10	0.07 ^{AB (0.00)}	0.57 ^{AB (0.00)}	0.29 ^{C (0.00)}	ND	1.33 ^{AB (0.02)}	0.06 ^{A (0.00)}	0.38 ^{BC (0.0)}
		20	0.07 ^{AB (0.00)}	0.57 ^{A (0.01)}	0.30 ^{C (0.01)}	ND	1.31 ^{AB (0.02)}	0.06 ^{A (0.00)}	0.37 ^{B (0.00)}
		30	0.07 ^{AB (0.00)}	0.61 ^{BC (0.01)}	0.26 ^{B (0.00)}	ND	1.46 ^{D (0.02)}	0.07 ^{B (0.00)}	0.34 ^{A (0.00)}
	290	10	0.09 ^{D (0.00)}	0.66 ^{DE (0.01)}	0.42 ^{E (0.01)}	ND	1.42 ^{CD (0.03)}	0.07 ^{AB (0.00)}	0.51 ^{D (0.01)}
		20	0.06 ^{A (0.00)}	0.63 ^{CD (0.01)}	0.23 ^{A (0.00)}	ND	1.43 ^{CD (0.03)}	0.07 ^{AB (0.00)}	0.33 ^{A (0.00)}
		30	0.07 ^{AB (0.00)}	0.68 ^{E (0.01)}	0.24 ^{A (0.00)}	ND	1.59 ^{E (0.02)}	0.07 ^{B (0.00)}	0.33 ^{A (0.01)}
<i>Eucalyptus nitens</i>	210	10	0.15 ^{B (0.00)}	0.45 ^{A (0.01)}	0.49 ^{D (0.01)}	ND	1.92 ^{A (0.01)}	0.10 ^{A (0.00)}	0.46 ^{CD (0.00)}
		20	0.19 ^{C (0.02)}	0.56 ^{C (0.05)}	0.70 ^{E (0.06)}	ND	2.07 ^{A (0.18)}	0.11 ^{B (0.01)}	0.69 ^{F (0.06)}
		30	0.13 ^{A (0.00)}	0.43 ^{A (0.00)}	0.36 ^{A (0.00)}	ND	1.94 ^{A (0.03)}	0.10 ^{A (0.00)}	0.37 ^{A (0.00)}
	250	10	0.15 ^{B (0.00)}	0.44 ^{A (0.00)}	0.44 ^{CD (0.00)}	ND	1.93 ^{A (0.02)}	0.10 ^{A (0.00)}	0.43 ^{BCD (0.00)}
		20	0.14 ^{AB (0.00)}	0.43 ^{A (0.00)}	0.38 ^{AB (0.00)}	ND	2.00 ^{A (0.03)}	0.11 ^{AB (0.00)}	0.38 ^{AB (0.00)}
		30	0.13 ^{AB (0.00)}	0.45 ^{AB (0.00)}	0.42 ^{BC (0.00)}	ND	2.04 ^{A (0.01)}	0.11 ^{AB (0.00)}	0.41 ^{ABC (0.00)}
	290	10	0.13 ^{A (0.00)}	0.47 ^{AB (0.01)}	0.37 ^{AB (0.01)}	ND	1.93 ^{A (0.03)}	0.10 ^{A (0.00)}	0.41 ^{ABC (0.00)}
		20	0.14 ^{AB (0.00)}	0.49 ^{B (0.01)}	0.47 ^{CD (0.00)}	ND	2.09 ^{A (0.02)}	0.10 ^{AB (0.00)}	0.62 ^{E (0.01)}
		30	0.15 ^{B (0.00)}	0.56 ^{C (0.01)}	0.34 ^{A (0.00)}	ND	2.81 ^{B (0.04)}	0.14 ^{C (0.00)}	0.46 ^{D (0.01)}
<i>Pinus radiata</i>	210	10	0.11 ^{AB (0.01)}	0.49 ^{BC (0.03)}	0.42 ^{DE (0.02)}	0.05 ^{A (0.00)}	2.51 ^{B (0.11)}	0.10 ^{CD (0.01)}	0.58 ^{DE (0.03)}
		20	0.10 ^{A (0.00)}	0.47 ^{AB (0.00)}	0.41 ^{CD (0.01)}	0.05 ^{A (0.00)}	2.35 ^{A (0.02)}	0.10 ^{BC (0.00)}	0.56 ^{CD (0.00)}
		30	0.10 ^{A (0.00)}	0.45 ^{A (0.00)}	0.35 ^{A (0.00)}	0.05 ^{A (0.00)}	2.30 ^{A (0.01)}	0.09 ^{A (0.00)}	0.49 ^{A (0.00)}
	250	10	0.10 ^{A (0.00)}	0.46 ^{AB (0.01)}	0.40 ^{CD (0.01)}	0.05 ^{A (0.00)}	2.33 ^{A (0.02)}	0.09 ^{AB (0.00)}	0.54 ^{BCD (0.01)}
		20	0.11 ^{B (0.00)}	0.55 ^{E (0.01)}	0.51 ^{F (0.01)}	0.06 ^{A (0.00)}	2.65 ^{CD (0.01)}	0.11 ^{D (0.00)}	0.74 ^{G (0.01)}
		30	0.11 ^{AB (0.00)}	0.50 ^{CD (0.00)}	0.44 ^{E (0.00)}	0.06 ^{A (0.00)}	2.50 ^{B (0.01)}	0.10 ^{BC (0.00)}	0.60 ^{EF (0.00)}
	290	10	0.10 ^{A (0.00)}	0.46 ^{A (0.00)}	0.37 ^{B (0.00)}	0.06 ^{A (0.00)}	2.36 ^{A (0.05)}	0.10 ^{AB (0.00)}	0.51 ^{AB (0.01)}
		20	0.11 ^{AB (0.00)}	0.51 ^{CD (0.01)}	0.44 ^{E (0.001)}	0.06 ^{A (0.00)}	2.54 ^{BC (0.04)}	0.10 ^{BC (0.00)}	0.63 ^{F (0.01)}
		30	0.11 ^{B (0.00)}	0.53 ^{DE (0.01)}	0.39 ^{BC (0.01)}	0.06 ^{A (0.00)}	2.74 ^{D (0.06)}	0.11 ^{D (0.00)}	0.54 ^{BC (0.01)}

Medias seguidas por la misma letra (en la columna) no difieren entre sí, al 5% de probabilidad por el test Tukey. ND = valor no detectado (<0.05%).

4.6.3. Valores químicos del material *in natura*, *pellets* y post tratamientos térmicos de los *pellets*

Los resultados de los análisis químicos se pueden apreciar en la Tabla 4.4. En la primera parte de la tabla se presenta los resultados de las biomásas *in natura* y *pellets* y, en la segunda parte, los valores químicos según temperatura y tiempo de torrefacción. Al comparar la biomasa *in natura* y los *pellets* (material sin torrefactar) se aprecia que el porcentaje de extractivos se incrementó al compactar la biomasa y con diferencias significativas entre los *pellets* de *Paulownia* y eucalipto. Lo mismo ocurrió con la lignina entre estas mismas especies. Resultados similares a esta investigación fueron encontrados por (Peng *et al.*, 2015).



Tabla 4.4. Análisis químicos de las cuatro especies consideradas en los ensayos de torrefacción.

Primera parte									
ID	Especie	Temp	Extractivos	Lignina	Cloro	Ti	CZ	MV	CF
<i>In natura</i>	<i>Paulownia</i>		9.17 ^{D (0.12)}	34.21 ^{CD (0.69)}	ND		1.16 ^{BC (0.04)}	79.78 ^{A (0.05)}	19.10 ^{F (0.07)}
<i>Pellets</i>	<i>Paulownia</i>		11.17 ^{E (0.41)}	35.09 ^{D (0.37)}	ND		1.31 ^{C (0.10)}	86.62 ^{E (0.27)}	11.70 ^{A (0.25)}
<i>In natura</i>	<i>Miscanthus</i>		3.66 ^{B (0.54)}	29.84 ^{B (0.14)}	0.07 ^{D (0.00)}		2.67 ^{D (0.08)}	80.50 ^{AB (0.10)}	16.80 ^{D (0.10)}
<i>Pellets</i>	<i>Miscanthus</i>		5.16 ^{C (0.46)}	29.86 ^{B (0.36)}	0.09 ^{E (0.00)}		2.60 ^{D (0.51)}	82.20 ^{C (0.57)}	14.80 ^{B (0.32)}
<i>In natura</i>	Eucalipto		2.16 ^{A (0.31)}	26.37 ^{A (0.47)}	0.04 ^{C (0.00)}		0.73 ^{AB (0.01)}	80.30 ^{A (0.57)}	19.10 ^{F (0.30)}
<i>Pellets</i>	Eucalipto		3.53 ^{AB (0.31)}	29.27 ^{B (0.07)}	0.04 ^{C (0.00)}		0.93 ^{ABC (0.02)}	81.34 ^{BC (0.32)}	17.70 ^{E (0.30)}
<i>In natura</i>	Pino		3.81 ^{B (0.11)}	33.66 ^{C (0.54)}	0.02 ^{B (0.00)}		0.46 ^{A (0.03)}	81.40 ^{BC (0.16)}	18.10 ^{E (0.19)}
<i>Pellets</i>	Pino		4.93 ^{C (0.24)}	33.92 ^{CD (0.69)}	0.02 ^{B (0.00)}		0.62 ^{ABC (0.01)}	83.48 ^{D (0.43)}	15.70 ^{C (0.51)}
Segunda parte									
Pellets torrefactados	<i>Paulownia elongata x fortunei</i>	210	3.45 ^{B (0.02)}	22.71 ^{A (0.01)}	ND	10	0.94 ^{A (0.18)}	80.98 ^{A (0.05)}	18.09 ^{A (0.21)}
						20	1.16 ^{A (0.27)}	81.93 ^{A (1.54)}	16.90 ^{A (1.81)}
						30	1.24 ^{A (0.17)}	81.73 ^{A (1.09)}	17.04 ^{A (1.12)}
		250	3.15 ^{A (0.02)}	33.81 ^{B (0.01)}	ND	10	1.16 ^{A (0.13)}	82.39 ^{B (0.15)}	16.45 ^{A (0.16)}
						20	1.34 ^{A (0.21)}	80.58 ^{AB (2.18)}	18.08 ^{AB (2.16)}
						30	1.07 ^{A (0.28)}	78.90 ^{A (0.78)}	20.03 ^{B (0.57)}
		290	3.57 ^{C (0.03)}	40.51 ^{C (0.01)}	ND	10	1.31 ^{A (0.27)}	82.28 ^{C (0.45)}	16.41 ^{A (0.72)}
						20	1.12 ^{A (0.09)}	79.33 ^{B (0.07)}	19.55 ^{B (0.16)}
						30	0.99 ^{A (0.10)}	71.74 ^{A (0.87)}	27.27 ^{C (0.78)}
	<i>Miscanthus x giganteus</i>	210	1.42 ^{B (0.01)}	26.10 ^{A (0.01)}	0.07 ^{B (0.00)}	10	3.30 ^{A (0.12)}	84.54 ^{B (0.55)}	12.16 ^{A (0.46)}
						20	3.54 ^{B (0.06)}	81.20 ^{A (1.00)}	15.26 ^{B (0.98)}
						30	3.50 ^{AB (0.05)}	81.88 ^{AB (1.58)}	14.62 ^{AB (1.57)}
		250	1.15 ^{A (0.01)}	28.54 ^{B (0.47)}	0.06 ^{A (0.00)}	10	3.40 ^{A (0.20)}	83.80 ^{C (0.64)}	12.79 ^{A (0.64)}
						20	3.44 ^{A (0.12)}	78.88 ^{B (0.80)}	18.34 ^{B (0.68)}
						30	3.49 ^{A (0.15)}	72.94 ^{A (1.09)}	23.57 ^{C (1.02)}
		290	1.62 ^{C (0.02)}	34.20 ^{C (0.02)}	0.06 ^{A (0.00)}	10	3.42 ^{A (0.16)}	83.08 ^{C (0.00)}	13.50 ^{A (0.16)}
						20	3.28 ^{A (0.26)}	79.86 ^{B (0.97)}	16.86 ^{B (1.23)}
						30	4.11 ^{A (0.20)}	70.39 ^{A (0.55)}	25.51 ^{C (0.34)}
	<i>Eucalyptus nitens</i>	210	1.02 ^{A (0.02)}	24.51 ^{A (0.03)}	0.04 ^{C (0.00)}	10	1.66 ^{A (0.52)}	87.54 ^{B (0.50)}	10.79 ^{A (0.85)}
						20	2.23 ^{A (0.16)}	86.14 ^{B (1.00)}	11.64 ^{A (1.16)}
						30	2.03 ^{A (0.26)}	83.87 ^{A (0.89)}	14.10 ^{B (0.91)}
		250	1.56 ^{B (0.03)}	24.60 ^{B (0.02)}	0.03 ^{B (0.00)}	10	1.60 ^{A (0.60)}	89.47 ^{B (1.81)}	8.92 ^{A (1.24)}
						20	1.77 ^{A (0.77)}	86.26 ^{A (0.34)}	11.97 ^{B (0.52)}
						30	1.75 ^{A (0.26)}	84.38 ^{A (0.32)}	13.86 ^{B (0.57)}
290		1.88 ^{C (0.02)}	34.60 ^{C (0.01)}	0.02 ^{A (0.00)}	10	2.02 ^{A (0.51)}	87.69 ^{C (0.71)}	10.29 ^{A (1.09)}	
					20	2.64 ^{A (0.90)}	81.28 ^{B (0.45)}	16.09 ^{B (1.35)}	
					30	2.69 ^{A (0.52)}	77.91 ^{A (0.93)}	19.40 ^{B (1.46)}	
<i>Pinus radiata</i>	210	3.21 ^{C (0.03)}	46.81 ^{A (0.01)}	0.01 ^{A (0.00)}	10	0.53 ^{A (0.19)}	82.62 ^{A (1.00)}	16.85 ^{A (1.10)}	
					20	0.39 ^{A (0.08)}	81.78 ^{A (4.27)}	17.83 ^{A (4.33)}	
					30	0.47 ^{A (0.06)}	81.61 ^{A (2.49)}	17.92 ^{A (2.53)}	
	250	2.93 ^{B (0.02)}	48.31 ^{B (0.02)}	0.01 ^{A (0.00)}	10	0.77 ^{A (0.02)}	84.03 ^{B (1.95)}	15.20 ^{A (1.97)}	
					20	0.73 ^{A (0.02)}	82.26 ^{AB (0.88)}	17.01 ^{AB (0.90)}	
					30	0.90 ^{A (0.18)}	79.60 ^{A (1.07)}	19.50 ^{B (1.12)}	
	290	2.13 ^{A (0.01)}	59.11 ^{C (0.03)}	ND	10	1.05 ^{A (0.01)}	78.84 ^{C (0.20)}	20.11 ^{A (0.21)}	
					20	1.24 ^{B (0.06)}	75.83 ^{B (0.59)}	22.93 ^{B (0.63)}	
					30	1.43 ^{C (0.04)}	72.64 ^{A (0.36)}	25.93 ^{C (0.39)}	

Ti = tiempo; Temp = temperatura; medias seguidas por la misma letra (en la columna) no difieren entre sí, al 5% de probabilidad por el test Tukey.

Por otro lado, unos de los parámetros más importantes y con más discusión en la actualidad es sobre el contenido de cloro en *pellets*, ya que se considera un componente que es nocivo para el medio ambiente y las normas son muy rigurosas al respecto. Debido a esto, una especie puede ser descartada aun cuando posea un buen potencial energético para la fabricación de biocombustible. Al respecto, se observó diferencias significativas de los niveles de cloro tanto para la biomasa *in natura*, *pellets* y *pellets* torrefactados entre las especies (Tabla 4). Todas las especies cumplen los valores establecidos por las normas internacionales, a pesar que el eucalipto (0.04%), que supera el límite (0.02%), es indeseado ya que en la combustión se transforma en HCl, Cl₂ o cloruros alcalinos como NaCl o KCl que causan corrosiones en los equipos (Carroll & Finnan, 2012).

Las cenizas también son consideradas como indeseables en el área energética, debido a que disminuyen el poder calorífico, causan baja eficiencia en el quemador e incrustaciones con consecuente aumento en los gastos del mantenimiento de los equipos (Garcia *et al.*, 2018). Para efectos de esta investigación, se observó diferencia significativa entre las especies de pino (0.46%) y *Miscanthus* (2.67%) (Tabla 4.4). Sin embargo, todas las especies están dentro de los parámetros establecidos por las normas alemanas. De acuerdo a Obernberger *et al.* (2010), el porcentaje de cenizas en la materia prima no influencia el proceso de peletización. Sin embargo, esto es válido siempre y cuando el porcentaje sea inferior al 10%, ya que puede causar desgastes en los

rodillos y en la matriz de la peletizadora, disminuyendo la vida útil del equipo. También la temperatura influencia el porcentaje de cenizas y el color del *pellet* (Figura 4.3), haciéndolo menos atractivo al consumidor, debido a que en ocasiones los *pellets* de coloración más oscura son relacionados con mayor contaminación o de menor calidad (Sgarbossa *et al.*, 2014; Pegoretti *et al.*, 2019). Al contrario, la coloración tiene que ver con el tipo de biomasa y si esta fue tratada térmicamente, tendrá mejores características y será de mejor calidad teniendo un mejor aprovechamiento energético en la combustión.

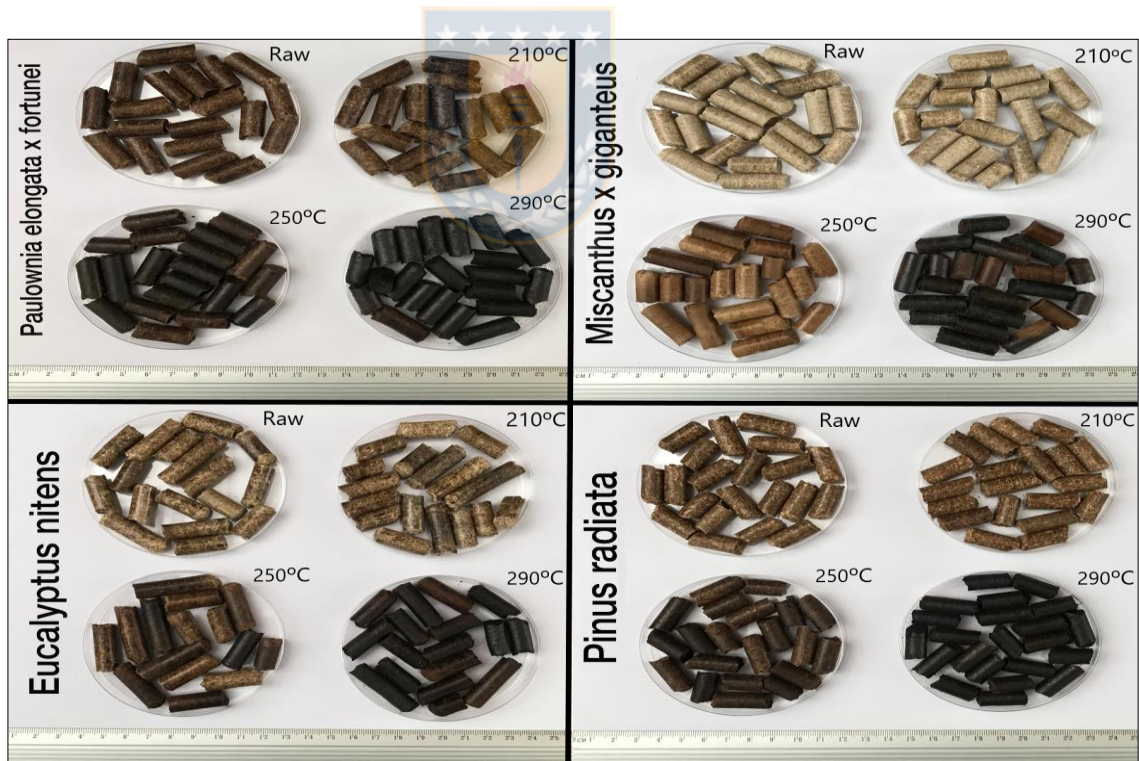


Figura 4.3. *Pellets in natura* y después del proceso térmico para las diferentes temperaturas estudiadas.

La rápida combustión inicial de *pellets* es un factor que afecta su calidad. La emisión rápida del material volátil (MV) y la relación con el carbono fijo (CF), son factores que contribuyen decisivamente para acelerar la ignición del combustible a temperaturas bajas (Poddar *et al.*, 2014). Se esperaba que los *pellets* estudiados presentaran comportamiento similar en las etapas iniciales de la combustión, ya que la relación MV/CF determinada presenta baja variación (aproximadamente 10%) (Tabla 4.4). Se observó que *Paulownia* presentó el menor índice de MV (79.78%) y el mayor índice de CF (19.10%), lo que implica un mayor tiempo de residencia del *pellet* en el quemador (Spanhol *et al.*, 2015). Los valores de esta investigación fueron similares a los encontrados por García *et al.* (2017), quienes estudiaron diferentes procedencias de *pellets* de madera, eucalipto, pino y sus cortezas.

Al realizar un tratamiento de torrefacción se altera la concentración de los constituyentes químicos de la biomasa. Generalmente, se degradan las hemicelulosas y celulosa que son los compuestos más fáciles de degradar. Por lo tanto, en esta investigación se observó diferencias significativas entre las tres temperaturas para los parámetros de extractivos, lignina y cloro. Cuando se obtuvo mayor degradación de holocelulosa resultó en un aumento proporcional del porcentaje de lignina. De igual forma, se puede explicar la relación positiva entre las diferentes temperaturas y el porcentaje de extractivos, que no solo se pueden ser tratados como extractivos, debido a la remoción de otros fragmentos degradados que pudieron ser solubilizados y extraídos con el solvente. Autores

como Zanuncio *et al.* (2014), explican que cuando las hemicelulosas se degradan, existe la posibilidad de formación de productos solubles acetona, lo que resulta en un mayor contenido de extractivos totales en el material. Este aumento de los extractivos en relación al aumento de la temperatura ocurrió en la *Paulownia*, *Miscanthus* y eucalipto, ya para el pino se comportó de forma inversa.

En el ensayo se observó que el tratamiento de 290°C fue el que presentó mayor porcentaje de lignina, siendo este parámetro un buen indicador de la calidad de biomasa para uso energético. Esto se debe a que la lignina presenta mayor poder calorífico de 20 – 30% más cuando es comparada con otros componentes de la madera (Vital *et al.*, 2013), además, es el componente más estable en la descomposición térmica, lo que justifica su mayor importancia en la temperatura de 290°C (López-González *et al.*, 2013). Por otra parte, si observamos el porcentaje de cenizas, se mantiene muy similar entre especies y entre temperatura. Aunque en el pino se observó diferencias significativas entre los tres tiempos (10, 20 y 30 min) en la temperatura de 290°C, cumple con las normas internacionales DIN. En cuanto al carbono fijo (CF) se observó que aumentó con respecto al incremento de la temperatura, caso contrario se presentó con el material volátil (MV). Esta relación también fue analizada por Perdigão *et al.* (2015), que encontraron valores de MV variando desde 64.40 a 86.86% y CF variando entre 12.80 y 35.22%, similares a los encontrados en esta investigación.

En la misma Tabla 4.4, observamos un parámetro importante en la calidad del pellet como es el cloro. Ya que como hemos mencionado, las normas para este parámetro son muy rigurosas y que además es excluyente a la hora de seleccionar especies. En este sentido, el porcentaje de cloro encontrado en esta investigación fue menor a los determinados por Alakangas (2005) y similares a los encontrados por Garcia *et al.* (2018).

Distintos estudios (Miranda *et al.*, 2009; Ahmad *et al.*, 2016) consideran que los porcentajes de azufre, nitrógeno y cloro son tan pequeños que pueden ser despreciados en la simplificación de cálculos. Sin embargo, otros investigadores como Duca *et al.* (2014) y Kirsten *et al.* (2016) asocian el cloro a problemas de corrosión en los equipos. Por lo tanto, existe un debate sobre este parámetro debido a la falta de información. Interrogantes como ¿puede el porcentaje de cloro en el eucalipto (0.04%) estar asociado directamente con la corrosión de los equipos? o ¿las dioxinas que se forman en la combustión son nocivas para la salud de las personas? En lo que hay certeza es que, por medio de un tratamiento térmico, como la torrefacción es posible disminuir el porcentaje de cloro en el biocombustible.

De acuerdo a Lu *et al.* (2019), cuando la biomasa se somete a temperaturas entre 200 – 360°C son ideales para la liberación del cloro en forma de gas y puede ser retirado hasta el 90% del mismo. Debido a esto, si observamos (Tabla 4.4) el porcentaje de cloro en el material *in natura*, *pellets* (no torrefactados) y *pellets* torrefactados notamos una disminución de este

parámetro. En el caso de la *Paulownia* se puede observar que después del tratamiento térmico no se detectó el cloro (menor a <0.01) o se eliminó por completo. Respecto al *Miscanthus*, se pudo retirar hasta un 66% de los *pellets* torrefactados. En el caso del pino, se retiró el 50%. El eucalipto fue la especie con mejores resultados en este parámetro, ya que fue la que contaba con mayor porcentaje de cloro considerándose la única especie en desatender las normas de calidad, y que luego de la torrefacción se logró disminuir un 50%, ajustándose de esta forma a las normas internacionales de calidad, convirtiéndose así en una especie apta para ser comercializada para la producción de energía térmica. De esta manera, podemos observar que el tratamiento térmico no solo mejora las propiedades energéticas, sino que también podría contribuir positivamente a la inclusión de especies (con alto potencial energético) que anteriormente eran excluidas por no cumplir con el porcentaje de cloro requerido por las normas y así, aumentar la gama de especies que se utilizan en la generación térmica.

4.6.4. Características de pérdida de masa, rendimiento en energía y consumo energético de las cuatro especies de *pellets* torrefactados

En la Tabla 4.5 son presentados los valores promedios de humedad, pérdida de masa (PM), rendimiento en masa (RM), rendimiento en energía (RE) y consumo energético (CE). Se observa que la humedad higroscópica de los *pellets* torrefactados disminuye debido al incremento de la temperatura de torrefacción.

Tabla 4.5. Valores de humedad, pérdida de masa, rendimiento en masa, rendimiento en energía y consumo energético de los *pellets* torrefactados

Especie	Temp (°C)	Ti (min)	H _(bs) (%)	PM (%)	RM (%)	RE (%)	CE (Kw/h)
<i>Paulownia elongata x fortunei</i>	210	10	5.24 ^H (0.02)	1.50 ^A (0.42)	98.50 ^C (0.42)	99.31 ^B (0.41)	0.10 ^A (0.00)
		20	4.54 ^G (0.01)	3.63 ^B (0.14)	96.37 ^B (0.14)	97.04 ^A (0.21)	0.17 ^A (0.06)
		30	3.12 ^F (0.03)	5.10 ^C (0.10)	94.90 ^A (0.10)	97.16 ^A (0.35)	0.73 ^B (0.06)
	250	10	2.86 ^E (0.01)	2.80 ^A (0.30)	97.20 ^C (0.30)	98.25 ^B (0.63)	0.63 ^A (0.06)
		20	2.46 ^D (0.03)	5.27 ^B (0.10)	94.73 ^B (0.10)	97.76 ^B (0.40)	0.73 ^A (0.46)
		30	2.14 ^C (0.01)	9.61 ^C (0.61)	90.39 ^A (0.61)	94.87 ^A (0.81)	0.97 ^A (0.06)
	290	10	1.40 ^B (0.08)	4.26 ^A (0.08)	63.83 ^A (0.08)	97.00 ^B (0.72)	0.90 ^A (0.00)
		20	0.00 ^A (0.00)	9.30 ^A (0.64)	60.47 ^A (0.64)	95.43 ^B (0.07)	1.15 ^B (0.07)
		30	0.00 ^A (0.00)	30.32 ^B (2.82)	69.68 ^A (2.82)	82.88 ^A (3.50)	1.53 ^C (0.06)
<i>Miscanthus x giganteus</i>	210	10	5.04 ^G (0.04)	1.57 ^A (0.06)	98.44 ^C (0.06)	98.83 ^A (0.58)	0.10 ^A (0.00)
		20	4.70 ^F (0.31)	3.33 ^B (0.12)	96.62 ^B (0.12)	98.07 ^A (0.46)	0.17 ^A (0.06)
		30	4.30 ^E (0.10)	4.28 ^C (0.07)	95.70 ^A (0.07)	98.01 ^A (0.52)	0.73 ^B (0.06)
	250	10	3.75 ^D (0.02)	2.40 ^A (0.15)	97.51 ^C (0.15)	98.50 ^B (0.52)	0.63 ^A (0.06)
		20	2.56 ^C (0.02)	4.67 ^B (0.96)	95.85 ^B (0.96)	98.31 ^B (0.57)	0.73 ^A (0.06)
		30	2.13 ^B (0.01)	6.50 ^C (0.16)	93.48 ^A (0.16)	96.67 ^A (0.22)	0.97 ^A (0.46)
	290	10	0.00 ^A (0.00)	3.87 ^A (0.09)	96.13 ^C (0.09)	96.94 ^B (0.35)	0.90 ^A (0.06)
		20	0.00 ^A (0.00)	6.72 ^B (0.52)	93.28 ^B (0.52)	96.00 ^B (0.29)	1.15 ^B (0.00)
		30	0.00 ^A (0.00)	21.83 ^C (0.25)	78.17 ^A (0.25)	87.73 ^A (0.71)	1.53 ^C (0.07)
<i>Eucalyptus nitens</i>	210	10	3.86 ^G (0.03)	1.28 ^A (0.16)	98.72 ^C (0.16)	98.52 ^B (0.32)	0.10 ^A (0.00)
		20	3.37 ^F (0.01)	3.54 ^B (0.31)	96.63 ^B (0.31)	96.32 ^A (0.44)	0.17 ^A (0.06)
		30	2.98 ^E (0.03)	4.12 ^B (0.30)	95.88 ^A (0.30)	97.90 ^B (0.79)	0.73 ^B (0.06)
	250	10	3.00 ^E (0.02)	3.29 ^A (0.80)	96.71 ^B (0.80)	98.81 ^A (0.85)	0.63 ^A (0.06)
		20	2.56 ^D (0.01)	4.54 ^A (0.44)	95.72 ^B (0.44)	98.80 ^A (0.69)	0.73 ^A (0.46)
		30	2.03 ^C (0.01)	6.65 ^B (0.05)	93.35 ^A (0.05)	98.13 ^A (0.30)	0.97 ^A (0.06)
	290	10	1.05 ^B (0.02)	3.10 ^A (0.07)	96.90 ^C (0.07)	98.50 ^B (0.16)	0.90 ^A (0.00)
		20	0.00 ^A (0.00)	8.87 ^B (0.86)	91.14 ^B (0.86)	97.06 ^B (0.72)	1.15 ^B (0.07)
		30	0.00 ^A (0.00)	29.85 ^C (0.98)	70.15 ^A (0.98)	84.22 ^A (0.11)	1.53 ^C (0.06)
<i>Pinus radiata</i>	210	10	3.54 ^H (0.01)	1.96 ^A (0.08)	98.04 ^C (0.08)	95.91 ^A (0.20)	0.10 ^A (0.00)
		20	3.13 ^G (0.01)	3.89 ^B (0.12)	96.17 ^B (0.12)	98.09 ^B (0.24)	0.17 ^A (0.06)
		30	3.09 ^F (0.01)	5.10 ^C (0.13)	94.90 ^A (0.13)	99.50 ^C (0.59)	0.73 ^B (0.06)
	250	10	2.75 ^E (0.01)	2.87 ^A (0.02)	97.13 ^C (0.02)	99.51 ^B (0.52)	0.73 ^A (0.06)
		20	2.14 ^D (0.02)	5.07 ^A (0.05)	94.93 ^B (0.05)	99.37 ^B (0.03)	0.90 ^B (0.00)
		30	1.19 ^C (0.01)	7.84 ^B (0.53)	92.16 ^A (0.53)	96.75 ^A (0.83)	0.97 ^B (0.06)
	290	10	1.04 ^B (0.01)	3.89 ^A (0.40)	96.11 ^C (0.40)	98.20 ^C (0.09)	0.97 ^A (0.12)
		20	0.00 ^A (0.00)	7.41 ^B (0.50)	92.45 ^B (0.50)	96.82 ^B (0.56)	1.13 ^A (0.06)
		30	0.00 ^A (0.00)	26.11 ^C (0.18)	73.89 ^A (0.18)	90.26 ^A (0.19)	1.53 ^B (0.06)

Temp = temperatura; Ti = tiempo; H_{bs} = humedad en base seca; PM = pérdida de masa; RM = rendimiento en masa; RE = rendimiento en energía; CE = consumo energético; medias seguidas por la misma letra (en la columna) no difieren entre sí, al 5% de probabilidad por el test Tukey.

La disminución de la humedad higroscópica de los *pellets* torrefactados se debe a la exclusión del agua libre, adhesión y la degradación térmica de los constituyentes químicos de la biomasa que tiene influencia directa en la reducción de la higroscopicidad de los *pellets*, ya que hay una remoción de los grupos hidroxilos (-OH) disponibles con los enlaces de hidrógenos con moléculas de agua y concentración de carbono (Phanphanich & Mani, 2011). La disminución de la humedad de los *pellets* supone una mejora en su calidad, debido a que se evita su hinchamiento y desintegración debido a su alta higroscopicidad, limita la actividad microbiana durante el almacenado (Liu *et al.*, 2014) y evita la reducción de su poder calorífico líquido.

Por otro lado, se observa mayores pérdidas de masa y menores rendimientos en energía a medida que la temperatura de torrefacción aumenta. El aumento de la pérdida de masa con mayores temperaturas de torrefacción es debido a la degradación térmica de los constituyentes químicos de la biomasa, principalmente hemicelulosas y fracciones de la celulosa. De acuerdo con Shang *et al.* (2012), durante la torrefacción, la descomposición térmica de las hemicelulosas ocurre entre 200 – 300°C, mientras que la degradación de la celulosa inicia en 270°C y la lignina en 300°C. Las hemicelulosas son menos tolerantes al calor por causa de su estructura y ramificaciones, ya que son fáciles de ser removidas de la cadena principal y se degradan en compuestos volátiles (Yang *et al.*, 2007).

De igual forma, en la Tabla 4.5, se observa que la pérdida de masa es superior a la pérdida de energía. De acuerdo con Rodrigues y Rousset (2009), en un proceso típico de torrefacción el producto sólido posee 70% de la masa inicial y 90% del contenido es energético. En esta investigación, durante la torrefacción de 290°C, se obtuvieron rendimientos en masa y energía próximos a 92% y 96%, respectivamente. Esto significa que el 10% de la masa perdida contenía apenas el 4% de la energía *in natura*. Como se mencionó anteriormente, hay pérdida de masa principalmente de hemicelulosas, además de la acumulación de lignina en los *pellets* torrefactados. Este hecho contribuye al alto rendimiento en energía, debido a que las hemicelulosas poseen bajo PCS (13.50 MJ kg⁻¹) y la lignina PCS de aproximadamente 25 MJ kg⁻¹ (Pereira, 2012). La lignina es el componente más energético de la biomasa vegetal, esto se debe a su alto nivel de aromaticidad, tamaño, disposición de la estructura y alto contenido de carbono (Haykiri-Acma *et al.*, 2010). Por otra parte, respecto al consumo de energía se determinó que fue superior en la temperatura más elevada (290°C) con el mayor tiempo de residencia (30 min), mostrando diferencias significativas entre los tres tiempos, algo esperado. A esta temperatura (290°C), ocurre un mayor gasto energético, pero, la mayor pérdida de masa incrementa el rendimiento energético y la calidad del biocombustible.

4.7. CONCLUSIONES

El rendimiento en energía de los *pellets* torrefactados se incrementó a pesar de la pérdida de su masa, debido a la degradación de sus constituyentes menos energéticos, mejorando con ello su eficiencia energética.

Los *pellets* torrefactados presentan menor porcentaje de humedad, menor higroscopicidad, mayor porcentaje de carbono fijo y mayor poder calorífico en función de la temperatura final de torrefacción.

La reducción del contenido de cloro también fue afectada por la temperatura y especies. Los *pellets* torrefactados presentaron una reducción de hasta 50% de la presencia de cloro, con lo cual cumple las normas internacionales de calidad.

Entre las temperaturas evaluadas en esta investigación, los *pellets* torrefactados a 290°C fueron los que presentaron un mejor conjunto de características energéticas.

El uso de material juvenil con corteza en la elaboración de *pellets* torrefactados, se demostró factible y con propiedades energéticas similares a las tradicionales cuando se ocupa material adulto.

5. CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL

La búsqueda de nuevas alternativas para la generación de energía limpia ha impulsado el uso de la biomasa y con ello la búsqueda de nuevas especies con potencial energético para la fabricación de *pellets*. En esta tesis doctoral se estudiaron diferentes biomásas maderables y no maderables, con el fin de evaluar las propiedades físico-químicas y energéticas bajo diferentes condiciones, como también evaluar el efecto de la densidad, contenido y distribución de lignina sobre la calidad de los *pellets*, para la producción de energía térmica.

En la actualidad los estudios de *pellets* y torrefacción han sido elaborados mayoritariamente de *Pinus radiata* de edades adultas como los realizados por Arteaga-Pérez *et al.* (2015) y Azócar *et al.* (2019). En cambio, esta tesis utilizó materia prima que corresponde a plantaciones jóvenes de pino y eucalipto de cinco años de edad, y materia prima de *Miscanthus* y *Paulownia* de uno y de dos años de edad, respectivamente. Esto señala que esta investigación aborda el procesamiento de materia prima no documentado a la fecha en Chile.

De acuerdo con Arteaga-Pérez *et al.* (2016), las biomásas lignocelulósicas poseen características muy similares, donde los parámetros químicos explican cerca del 80% de la calidad de los *pellets*, principalmente contenidos de cenizas y de cloro. El diferencial de porcentaje se explica por la densidad, cantidad y distribución de lignina, que afecta la calidad estructural de los *pellets*, ya que hay evidencia que indica que las características histológicas tienen un papel

importante en la compactación y, por lo tanto, en la durabilidad mecánica de los *pellets*.

Si se observa el contenido y distribución de lignina de las especies estudiadas, se puede apreciar que la distribución de lignina del pino fue homogénea y que, junto a los otros atributos de la especie, los *pellets* elaborados fueron los de mejor calidad. Por otra parte, llama la atención que el eucalipto posea el menor porcentaje de lignina (26.4%) y distribución sectorizada (heterogénea), generando en los *pellets* zonas más friables que otras. A pesar de esto, eucalipto presenta los mejores valores en durabilidad mecánica (98.84%), debido a su alta densidad a granel (693.40 kg m^{-3}) que influencia directamente la durabilidad y, por lo tanto, su calidad.

Otra especie interesante de analizar es *Paulownia*. Esta especie presenta el mayor porcentaje de lignina (34.20%), y distribución homogénea, similar a la del pino. Pero no siempre gran cantidad y buena distribución de lignina resulta en una mejor calidad *pellets*, ya que, en este caso, presentó el menor porcentaje de durabilidad (96.25%). Esto se puede explicar porque la especie presenta menor densidad a granel (604.29 kg m^{-3}), siendo la más baja de entre todas las especies analizadas.

Por otro lado, aun cuando las especies presenten buen desempeño en las características evaluadas, es posible que algunas propiedades, como el poder calorífico, se puedan incrementar mejorando la competitividad del biocombustible (Van Der Stelt *et al.*, 2011). Esto puede realizarse mediante tratamiento térmico,

ya que existen estudios que señalan que las propiedades (físico-químicas y energéticas) pueden ser mejoradas positivamente a través de la torrefacción (Chen *et al.*, 2015). Para ello, es necesario conocer, para cada tipo de biomasa, la temperatura y tiempo óptimo de torrefacción, además de sus combinaciones, ya que define los rendimientos alcanzados (Arteaga-Pérez *et al.*, 2016).

Las biomásas torrefactadas de las especies evaluadas tuvieron un incremento positivo en las características energéticas, donde la especie de *Paulownia* se destacó incrementando hasta un 40% en el PCL desde su estado *in natura* hasta posterior al tratamiento térmico, considerando temperatura y tiempo de residencia de 290°C/30min, respectivamente. Las otras especies (*Miscanthus*, eucalipto y pino) tuvieron un aumento de 30% en el PCL. Cabe hacer notar que la torrefacción es un proceso costoso por lo que se debe tener en cuenta la recuperación de algunos vapores o disponer de un sistema eficiente de recuperación de calor para que sea viable. A pesar de ello, es un método de densificación energética que está siendo ampliamente estudiado con el fin de incrementar los beneficios del *pellet* y hacerlo más competitivo frente a otros combustibles, como también para reducir parámetros químicos, como el cloro, que son limitante en algunas especies.

Otro aspecto a considerar en la torrefacción es la presencia de cloro en la biomasa. Hoy en día existe poca información acerca de este parámetro, ya que los estudios sobre el comportamiento del cloro en *pellets* utilizados en estufas son escasos. Se conoce que una especie puede ser excluida por presentar

porcentajes sobre el 0.02% de cloro. Esto ocurrió en el estudio con la especie eucalipto que presentó porcentaje de cloro de 0.04% en su estado *in natura*, superiores a lo exigido por las normas internacionales como la ENplus (ENplus, 2015). Pero después de ser sometida al tratamiento térmico de torrefacción, temperatura y tiempo de residencia de 290°C/30min respectivamente, se obtuvo una disminución del 50% en el cloro. Similar situación se presentó con la especie pino, que pasó de su estado *in natura* de 0.02% a la eliminación total del cloro después del proceso de torrefacción.

Por lo tanto, se deben buscar soluciones como la torrefacción para que, como es el caso Chile, se pueda utilizar como biocombustible las plantaciones de eucalipto de corta rotación. Esto señala la importancia del proceso de torrefactado, que permite adecuar y mejorar las propiedades de las biomásas y aprovechar al máximo el potencial energético, así como, aumentar las opciones de especies utilizadas para obtener *pellets* de excelente calidad.

6. CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones de este trabajo de tesis doctoral establecen que:

- Las especies *Paulownia elongata x fortunei* y *Miscanthus x giganteus* mostraron buen nivel de adaptación a los diferentes sitios, determinándose que las condiciones mediterráneas son ideales para su establecimiento con fines energéticos.
- Los *pellets* provenientes de biomásas forestales (*P. radiata* y *E. nitens*) presentaron mejores propiedades para la producción de bioenergía que los provenientes de biomásas no maderables (*Paulownia* y *Miscanthus*).
- El uso de la microscopía (SEM y CLSM), resultó ser una herramienta fundamental para evaluar la compactación de la biomasa desde una perspectiva anatómica, especialmente la distribución de lignina, que influencia la calidad estructural de los *pellets* y por lo tanto, su calidad.
- La técnica del tratamiento térmico (torrefacción) incrementa notoriamente las propiedades físico-químicas y energéticas mejorando con ello la eficiencia energética. Además, reduce hasta en un 50% la presencia del cloro después del proceso de torrefacción, esto ayuda a ampliar la gama de especies que se emplean en la fabricación de este biocombustible.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, P. W. R., & Lindegaard, K. (2016). A critical appraisal of the effectiveness of UK perennial energy crops policy since 1990. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 188–202. Doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.126.
- Ahmad, A. A., Zawawi, N. A., Kasim, F. H., Inayat, A., & Khasri, A. (2016). Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1333–1347. Doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.030.
- Akdeniz, F., Biçil, M., Karadede, Y., Özbek, E., Özdemir, G. (2018). Application of real valued genetic algorithm on prediction of higher heating values of various lignocellulosic materials using lignin and extractive contents. *Energy*, 160, 1047-1054.
- Alakangas, E. (2005). Properties of wood fuels used in Finland. Project Report PRO2/P2030/05, 104. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/bio-south_wood_fuel_properties.pdf.
- American Society for Testing and Materials, [ASTM] (2007). Standard method for chemical analyses of wood charcoal. D1762-84.
- Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., Espinoza, D., Radovic, L. R., & Jiménez, R. (2015). Torrefaction of *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*: A combined experimental and modeling approach to process synthesis. *Energy for Sustainable Development*, 29, 13–23. Doi.org/10.1016/j.esd.2015.08.004.
- Arteaga-Pérez, L., Segura, C., & Diéguez Santana, K. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad: Revista de Química Teórica y Aplicada*, 73(573), 60–68.
- Associação Brasileira das Indústrias de Pellets (ABIPEL). 2016. Recuperado de <http://www.abipel.com.br/media/5468/ABIPEL-maio-2016.pdf>.

- Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J., & Jara, P. (2019). Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, 237(October 2018), 823–832. Doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.039.
- Baxter, C., Darvell, I., Jones, M., Barraclough, T., Yates, E., & Shield, I. (2014). *Miscanthus* combustion properties and variations with *Miscanthus* agronomy. *Fuel*, 117, 851–869. Doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.003.
- Bhatt, B. P., & Todaria, N. P. (1990). Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs. *Biomass*, 21(3), 233–238. Doi.org/10.1016/0144-4565(90)90067-T.
- Bhattacharya, C., Leon, A., Rahman, M. (2002). A Study on Improved Biomass Briquetting. Energy Program, School of Environment, Resources and Development Asian Institute of Technology. Recuperado de <http://www.retsasia.ait.ac.th/Publications/A%20Study%20on%20Improved%20Biomass%20Briquetting.pdf>.
- Brand, M. A. 2010. Energía de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 131 p.
- Cardoso, M. B., Ladio, A. H., Dutrus, S. M., & Lozada, M. (2015). Preference and calorific value of fuelwood species in rural populations in northwestern Patagonia. *Biomass and Bioenergy*, 81, 514–520. Doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.003.
- Carroll, J. P., & Finnan, J. (2012). Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, 112(2), 151–159. Doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.03.012.
- Castillo-Martínez, C., Gutiérrez, M., Buenrostro, M., Cetina, V., Cadena, J. (2012). Regeneración de plantas de *Paulownia elongata* Steud. por organogénesis directa. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(10), 41-49.
- Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables [CIFES]. (2016). Reportes Cifes: Energías renovables en el mercado eléctrico chileno. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. 10 p.

- Cerdá, E. 2012. La biomasa en España: una fuente de energía renovable con gran futuro. Documentos de Trabajo, (1), 1-72.
- CGE (Compañía General de Electricidad). (2020). Tarifas de suministro CGE. [online]. Recuperado de <https://www.cge.cl/informacion-comercial/tarifas-y-procesos-tarifarios/tarifa-de-suministro/>[Acceso: 18 mayo 2020].
- Chen, W., Peng, J. & T.Bi, X. (2015). A state-of-the art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847- 866. Doi:10.1016/j.rser.2014.12.039.
- Chen, L., Wang, S., Meng, H., Wu, Z., & Zhao, J. (2017). Synergistic effect on thermal behavior and char morphology analysis during co-pyrolysis of paulownia wood blended with different plastics waste. *Applied Thermal Engineering*, 111, 834–846. Doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.155.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente – CONAMA. (2010). Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. Recuperado de http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf.
- Couto, L., Müller, M., De Silva, A., Conde, L. (2004). Produção de Pellets de Madeira – O Caso da Bio-Energy no Espírito Santo. *Revista Biomassa & Energia*, 1(1), 45-52.
- Couto, C., Abrahão, P., Faria, R., Couto, F. (2012). Utilizações Energéticas da Biomassa Vegetal. *Revista Biomassa & Energia*, 5(1), 85-106.
- De Souza and Sant’Anna, C. (2012). Microscopy as a tool to follow deconstruction of lignocellulosic biomass. 639–645.
- Delaye, M., & MAIA, F. (2015). Biochar a partir de biomassa de *Miscanthus* e Quebracho, produzido em forno tubular em sistema aberto e sob fluxo de nitrogênio. Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). Recuperado de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1039706/1/ComunicadoTecnico3752015.pdf>.
- Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture,

- ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 20(1), 105–111. Doi.org/10.1260/014459802760170420.
- Demirbaş, A. (2003). Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources*, 25(7), 629–635. Doi.org/10.1080/00908310390212336.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 52182: Testing of wood; determination of density. Berlin: CEN, 1976. 3 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 51720: Testing of solid fuels - Determination of volatile matter content. Berlin: CEN, 2001. 8 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 14961-2: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use. Berlin: CEN, 2011b. 15 p.
- Deutsches Institut Für Normung, DIN EN 14961-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use. Berlin: CEN, 2012a. 16 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method. Berlin: CEN, 2010a. 10 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 14918: Determination of calorific value. Berlin: CEN, 2010b. 63 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15103: Determination of bulk density. Berlin: CEN, 2010c. 14 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods. Berlin: CEN, 2011c. 15 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15210-1: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. Berlin: CEN, 2005. 12 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15296: Conversion of analytical results

- from one basis to another. Berlim: CEN, 2011e. 15 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 14775: Determination of ash content. Berlim: CEN, 2007. 12 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15289: Determination of total content of sulfur and chlorine Berlim: CEN, 2011. 19 p.
- Deutsches Institut für Normung, DIN EN 15297: Determinación de elementos menores. Berlim: CEN, 2011b. 3 p
- Días, M. (2002). Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 104 p.
- Díez, H. E., & Pérez, J. F. (2017). Physicochemical Characterization of Representative Firewood Species Used for Cooking in Some Colombian Regions. *International Journal of Chemical Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/4531686>.
- Duca, D., Riva, G., Foppa, Pedretti, E., Toscano, G. (2014). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certification. *Fuel*, 135(2014), 9-14. doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042.
- El-Bassam, N. (1996). Renewable energy, potential energy crops for Europe and the Mediterranean Region. FAO Regional Office for Europe. REU technical series 46, 200 p.
- ENplus. Handbook. Quality Certification Scheme For Wood Pellets. 2015
Recuperado de http://www.enpluspellets.eu/wpcontent/uploads/2016/03/ENplusHandbook_part1_V3.0_General_EPCinternational.pdf.
- Escobar J. & Weil E. 2018. Identificación de la Cadena Productiva de Elaboración de Pellets de Madera. Informe de Consultoría. Corporación de Fomento de la Producción (Corfo), Santiago, Chile.
- Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires [FAUBA]. (2012). Biomasa y energía. Recuperado de <http://ri.agro.uba.ar/cgi-bin/library.cgi->

about-miscanthus.

- Fagerström, J., Steinvall, E., Boström, D., & Boman, C. (2016). Alkali transformation during single pellet combustion of soft wood and wheat straw. *Fuel Processing Technology*, 143, 204–212. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.016.
- Fengel, D. and Wegener, G. (1984) Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, 613, 1960-1982.
- Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J., Mireya, V., Salvador, V. & Nuria, A. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*, 20(2002), 97–111.
- Flach, B., Bendz, K., Krautgartner, R., Lieberz, S. (2013). EU Biofuels Annual 2013. USDA Foreign Agricultural Service. 34 p.
- Foelkel, C. (2007). Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura. In: Eucalyptus online book & newsletter. Recuperado de http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07_residuoslenhosos.pdf.
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2012). Activities related to poplar and willow cultivation and utilization in Serbia. 25 p.
- Food and Agriculture Organization – FAO. (2018). FAOSTAT-Produccion de pellets [online]. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/FO> [Acceso: 18 mayo 2020].
- Garcia, D. (2010). Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil. (Tesis de maestría). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brasil.
- Garcia, D. P., Caraschi, J. C., & Vantorim, G. (2016). Decomposição térmica de pellets de madeira por tga. holos, 1, 327. Doi.org/10.15628/holos.2016.3886.
- Garcia, D. P., Caraschi, J. C., & Vantorim, G. (2017). Emissões de gases do efeito estufa da queima de pellets de madeira. *Floresta*, 47(3), 297–306. Doi.org/10.5380/rf.v47i1.50952.
- Garcia, D. P., Caraschi, J. C., Vantorim, G., Prates, G. A., & Protásio, T. de P.

- (2018). Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. *Revista Ciência Da Madeira*, 9(1), 45–53. Doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p45-53.
- Garcia, D. P., Caraschi, J. C., Ventorim, G., Vieira, F. H. A., & Protásio, T. (2019). Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). *Renewable Energy*, 139, 796–805. Doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.103.
- Ghetti, P. 1986. DTG combustion behaviour of coal: Correlations with proximate and ultimate analysis data. *Fuel*, 65(5), 636–639.
- Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C. J., Bi, X., Kim, C. S., & Sokhansanj, S. (2014). Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification. *Applied Energy*, 134, 133–142. Doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.076.
- Gillespie, D., Everard, D., Fagan, C., & McDonnell, P. 2013. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. *Fuel*, 111, 771-777.
- Guofeng, S. 2014. Emission factors of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential solid fuel combustions. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-39762-2#about>.
- Gysling J. & Soto D. 2016. *Industria Forestal Primaria en Chile, período 2006-2015*. Instituto Forestal, Santiago, Chile.
- Hamid, R., Fahimeh, Y., Jim L., Shahab, S. (2020). Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technology*, Volume 205 August 2020 Article 106437.
- Haykiri-Acma, H., Yaman, S., & Kucukbayrak, S. (2010). Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 91(7), 759–764. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.009.

- Hernández-Hernández, H. M., Chanona-Pérez, J. J., Calderón-Domínguez, G., Perea-Flores, M. J., Mendoza-Pérez, J. A., Vega, A., Ligeró, P., Palacios-González, E., & Farrera-Rebollo, R. R. (2014). Evaluation of agave fiber delignification by means of microscopy techniques and image analysis. *Microscopy and Microanalysis*, 20(5), 1436–1446. Doi.org/10.1017/S1431927614012987.
- Holleman-Wiberg's. (1995). Inorganic Chemistry edited by Nils Wiberg. *Journal of Chemical Education*, 79(8), 944.
- Hua, Z., Ching-Ju C., Xin-Yu L., & Yao Gao Z. 1986. Cultivation and Utilization, Academy of Forestry, ANFBS and IDRC, Beijing, China.
- Iftikhar, M., Asghar, A., Ramzan, N., Sajjadi, B., & Chen, W. yin. (2019). Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, 122, 1–16. Doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.005.
- Indústrias Brasileiras de Arvores – IBÁ. Anuário estatístico da IBÁ 2019. Brasília, 2019. 80p.
- Instituto Forestal – INFOR. Anuário Forestal “Estadísticas Forestales 2016, Boletín Estadístico N°154”. Santiago, Chile. Agosto 2016.
- Instituto Forestal – INFOR. (2019). Anuario Forestal 2019. Anuario Forestal INFOR, 140, 1–154. <https://doi.org/ISBN:978-956-318-098-5>.
- Jagustyn, B., Kmiec, M., Smędowski, Ł., & Sajdak, M. (2017). The content and emission factors of heavy metals in biomass used for energy purposes in the context of the requirements of international standards. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 704–714. Doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.007.
- Kalaycioglu, H., Deniz, I., & Hiziroglu, S. (2005). Some of the properties of particleboard made from *Paulownia*. *Journal of Wood Science*, 51(4), 410–414. Doi.org/10.1007/s10086-004-0665-8.
- Kasamaki P. 2007. La *Paulownia sp.* como base de los cultivos energéticos. Recuperado de <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>.

- Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L., & Raiko, R. (2014). The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass and Bioenergy*, 66, 232–239. Doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.015.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H. W., & Repke, J. U. (2016). Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*, 148, 163–174. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013.
- Lam, P. S., Sokhansanj, S., Bi, X. T., Lim, C. J., & Larsson, S. H. (2012). Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). *Bioresource Technology*, 116, 396–402. Doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.093.
- Leite, E. R. da S., Protásio, T. de P., Rosado, S. C. da S., Trugilho, P. F., Tonoli, G. H. D., & Bufalino, L. (2014). Avaliação da qualidade da madeira de *Coffea arabica* L. como fonte de bioenergia. *Cerne*, 20(4), 541–549. Doi.org/10.1590/01047760201420041282.
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J., Scurlock, J., & Huisman, W. 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, (19), 209-227.
- Li, H., Pu, Y., Kumar, R., Ragauskas, A. J., & Wyman, C. E. (2014). Investigation of lignin deposition on cellulose during hydrothermal pretreatment, its effect on cellulose hydrolysis, and underlying mechanisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 111(3), 485–492. Doi.org/10.1002/bit.25108.
- Lino, J., Fernando, A., Barbosa, B., Boléo, S., Costa, J., Duarte, M., & Mendes, B. 2014. Phytoremediation of Cd and Ni contaminated wastewaters by *Miscanthus*. In: Hoffmann, C., Baxter, D., Maniatis, K., Grassi, A., Helm, P. (eds) Proceedings of the 22nd European biomass conference and Exhibition, setting the course for a Biobased Economy. pp. 303 – 307. ETA-Renewable Energies (2014).

- Liu, Z., Quek, A., & Balasubramanian, R. (2014). Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, 113, 1315–1322. Doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.087.
- Llorente, M. J. F., Laplaza, J. M. M., Cuadrado, R. E., & García, J. E. C. (2006). Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion. *Fuel*, 85(9), 1157–1165. Doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.019.
- López, F., Pérez, A., Zamudio, M., De Alva, E., & García, J. C. (2012). *Paulownia* as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. *Biomass and Bioenergy*, 45, 77–86. Doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.010.
- López-González, D., Fernandez-Lopez, M., Valverde, J. L., & Sanchez-Silva, L. (2013). Thermogravimetric-mass spectrometric analysis on combustion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 143, 562–574. Doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.052.
- Lu, P., Huang, Q., Bourtsalas, A. C. (Thanos.), Themelis, N. J., Chi, Y., & Yan, J. (2019). Review on fate of chlorine during thermal processing of solid wastes. *Journal of Environmental Sciences*, 78, 13–28. Doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.003.
- Luscombe, D., & Brasil, G. (2004). Dioxinas e Furanos. Greenpeace.Org.Br, 1–2. <http://www.greenpeace.org.br/toxicos/pdf/dioxina.doc>.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2003). An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling and Processing*, 15(3), 160–168.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. Doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- Meehan, G., Finnan, M., & Donnell, M. (2013). The effect of harvest date and harvest method on the combustion characteristics of *Miscanthus x giganteus*. *GCB Bioenergy*, 5(5), 487–496. Doi.org/10.1111/gcbb.12003.
- Mello, W. Z. (2001). Precipitation chemistry in the coast of the Metropolitan

- Region of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Pollution*. 114, 235-242.
- Mendonça, R. T., Jara, J. F., González, V., Elissetche, J. P., & Freer, J. (2008). Evaluation of the white-rot fungi *Ganoderma australe* and *Ceriporiopsis subvermispora* in biotechnological applications. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(11), 1323–1330. Doi.org/10.1007/s10295-008-0414-x.
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Rojas, S., & Montero, I. (2009). Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, 88(11), 2106–2112. Doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.015.
- Moon, C., Sung, Y., Ahn, S., Kim, T., Choi, G., & Kim, D. 2013. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (4), 232– 240.
- Muñoz, F., & Cancino, J. (2014a). Antecedentes de *Miscanthus x giganteus* para la producción de bioenergía. 62. Recuperado de http://www2.udec.cl/~fmunoz/Libro_Miscanthus.pdf.
- Muñoz, F., & Cancino, J. (2014b). Antecedentes de *Paulownia elongata x fortunei* para la producción de bioenergía. Recuperado de http://www2.udec.cl/~fmunoz/Libro_Paulownia.pdf.
- Muñoz, F., Cancino, J., Rodríguez, R., & Olave, R. (2018). Evaluación de crecimiento, rendimiento y calorimetría de biomasa de *Miscanthus x giganteus* (Poaceae) establecido en el centro-sur de Chile. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias, UNCUYO* 50(1), 1853-8665.
- Calderón, A. A. (2015). Estimación de la disponibilidad de biomasa forestal para la generación de energía eléctrica en 10 zonas priorizadas (pp. 1–53). Tegucigalpa. Recuperado de <http://clifor.hn/wp-content/uploads/2019/09/disponibilidad-biomasa-forestal 015.pdf>.
- Musule, R., Acuña, E., Romero-Hermoso Osorio, L. S., Domínguez, Z., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. R., Teixeira Mendonça, R., González, M. E., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2018). Growing up at different altitudes:

- changes in energy content of the *Abies religiosa* Wood. *BioEnergy Research*, 11(1), 209–218. Doi.org/10.1007/s12155-017-9889-5.
- Nhuchhen, D., Basu, P., & Acharya, B. (2014). A Comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 1–56. Doi.org/10.5171/2014.506376.
- Nielsen, K., Gardner, J., Poulsen, T., Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41(4), 414–425.
- Nones, L. (2014). Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina. (Tesis de maestría). Universidade do Estado de Santa Catarina, Paraná, Brasil.
- Obernberger, I., Brunner, T., & Barnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973–982.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets*. London: Earthscan, 593 p.
- Oliveira, M. (2015). Pellets: Pequenos notáveis. *Biomais*. Curitiba. 2(10): 22–32.
- Olmstead, J.A., & Gray, D.G. (1997) Fluorescence spectroscopy of cellulose, lignin and mechanical pulps: *A Review*. *Journal of Pulp and Paper Science*, 23, J571–J581.
- Oveisi, E., Lau, A., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X., Larsson, S. H., & Melin, S. (2013). Breakage behavior of wood pellets due to free fall. *Powder Technology*, 235, 493–499. Doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.022.
- Paula, R., Trugilho, F., Napoli, A., & Bianchi, M. (2011). Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, 7(2), 237–246.
- Payme, J.D. (1978). Improving quality of pelleted feeds, *Milling Feed and Fertilizer*. 161 34–41.
- Pegoretti, H. J., Chaves, M. D., Vidaurre, G. B., Brocco, V. F., Souza, D. P. de, & Protásio, T. D. P. (2019). Colorimetría de pellets de eucalipto y residuos de

- la cafeicultura y sus relaciones con los parámetros de calidad. *Scientia Forestalis*, 47(121), 114–124. Doi.org/10.18671/scifor.v47n121.11.
- Pegoretti, H., Donaria, M., Vidaurre, G., Rogerio, C., & Protásio, T. (2020). Pelletization of *Eucalyptus* wood and coffee growing wastes : Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 149, 128–140. Doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015.
- Peng, J. H., Bi, X. T., Sokhansanj, S., & Lim, C. J. (2013). Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, 111, 411–421. Doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.048.
- Peng, J., Wang, J., Bi, X. T., Lim, C. J., Sokhansanj, S., Peng, H., & Jia, D. (2015). Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 129, 168–173. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.010.
- Perdigão, M., Freitas, D. C., Costa, E. V. S., & Pereira, B. L. C. (2015). Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 36(87),1-8. Doi.org/10.4336/2016.pfb.36.87.1093.
- Pereira, B. (2014). Propriedades de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos. (Tesis de maestria). Universidade Federal de Viçosa, Minas, Brasil.
- Pereira, Bárbara Luisa Corradi. (2012). Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. 93.
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2): 1246–1253. Doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028.
- Pinto, A. (2015). Avaliação da biomassa de *Paulownia* enquanto combustível na forma peletizada. (Dissertação de mestrado). Instituto politécnico de Viseu, Portugal. 129 p.
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., Wright, J., & Denig, J. (2012). Fuel properties and suitability of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus macarthurii*

- for torrefied wood and pellets. *BioResources*, 7(1), 217–235. Doi.org/10.15376/biores.7.1.0217-0235.
- Płażek, A., & Dubert, F. (2010). Improvement of medium for *Miscanthus x giganteus* callus induction and plant regeneration. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 52(1), 105–110. doi.org/10.2478/v10182-010-0013-9.
- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, A., Hossain, M., Jamal, S., & Gafur, A. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131: 43–48. doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.061.
- Poletto, M., Ornaghi Júnior, L., & Zattera, J. (2014). Native cellulose: Structure, characterization and thermal properties. *Materials*, 7(9), 6105–6119. Doi.org/10.3390/ma7096105.
- Protásio, T., Bufalino, L., Tonoli, D., Couto, M., Trugilho, F., & Guimarães Júnior, M. (2011). Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(66), 113–122. Doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113.
- Protásio, P., Bufalino, L., Tonoli, D., Guimarães Junior, M., Trugilho, F., Mendes, M. (2013). Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. *Bioresources*, 8(1), 1166-1185.
- Protásio, T., Trugilho, P. F., De Siqueira, H. F., De Melo, I. C. N. A., Andrade, C. R., & Guimarães Junior, J. B. (2015). Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(84), 435. Doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.843.
- Purohit, A. N., & Nautiyal, A. R. (1987). Fuel wood value index of Indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*, 4, 177–182.
- Quirino, F. (2002). Utilização energética de resíduos vegetais. Laboratório de produtos florestais LPF/IBAMA. Módulo do Curso “Capacitação de agentes

- multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”. Recuperado de www.funtec.org.br/arquivos/aproveitamento.pdf.
- Reina, L., Botto, E., Mantero, C., Moyna, P., & Menéndez, P. (2016). Production of second generation ethanol using *Eucalyptus dunnii* bark residues and ionic liquid pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 93, 116–121. Doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.023.
- Ríos-Badrán, I. M., Luzardo-Ocampo, I., García-Trejo, J. F., Santos-Cruz, J., & Gutiérrez-Antonio, C. (2020). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, 145, 500–507. Doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048.
- Rodrigues, T. O., Rousset, P. L. (2009). Effects of torrefaction on energy properties of *Eucalyptus grandis* Wood. *Cerne*, 15(4), 446- 452.
- Rojas, M. (2004). Prefactibilidad Técnica y Económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Roncucci, N., Nassi O Di Nasso, N., Bonari, E., & Ragolini, G. (2015). Influence of soil texture and crop management on the productivity of *Miscanthus* (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu.) in the Mediterranean. *GCB Bioenergy*, 7(5), 998–1008. Doi.org/10.1111/gcbb.12202.
- Rosa, A., Hortal, J., Vidal, T., Colom, J., & Torres, A. (2004). Caracterización de Kenaf y *Miscanthus sinensis* para la fabricación de papel. *Revista de química teórica y aplicada*, 61, 12 – 24.
- Sadiku, N. A., Oluyege, A. O., & Sadiku, I. B. (2016). Analysis of the calorific and fuel value index of Bamboo as a source of renewable biomass Feedstock for energy generation in Nigeria. *Lignocellulose*, 5(1), 34–49.
- Sahu, G., Sarkar, P., Chakraborty, N., & Adak, K. (2010). Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 369–378. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.12.001.

- Saldarriaga, F., Pablos, A., Amutio, M., Aguado, R., Olazar, M. (2013). Determination of moisture content, proximate and lignocellulosic analysis of biomass by thermogravimetric analysis. Recuperado de http://www.aepro.com/files/congresos/2013logronio/CIDIP2013_1001_1010.4025.pdf.
- Santiago-Ortega, M., Honorato-Salazar, J., Quero-Carrillo, A., Hernandez-Garay, A., López-Castañeda, C., & López-Guerrero, I. (2016). Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de etanol. *Agrociencia*, 50, 711 – 726.
- Scally, L., Hodgkinson, T., & Jones, M. (2007). Origins and taxonomy of *Miscanthus*. In: Jones M., Walsh M. (Eds.). *Miscanthus* for energy and fibre. Earthscan, London, UK. p. 1-9.
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Nita, V. (2015). The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: *Políticas and facts*. *Environmental Development*, 15(2015), 3–34. Doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.006.
- Sebio-Puñal, T., Naya, S., López-Beceiro, J., Tarrío-Saavedra, J., & Artiaga, R. (2012). Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1163–1167. Doi.org/10.1007/s10973-011-2133-1.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031.
- Shang, L., Nielsen, N. P. K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Thomsen, T., & Henriksen, U. B. (2012). Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*, 101, 23–28. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.03.013.
- Silva, S. B., Arantes, M. D. C., de Andrade, J. K. B., Andrade, C. R., Carneiro, A.

- de C. O., & Protásio, T. de P. (2020). Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. *Renewable Energy*, 147, 1870–1879. Doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.131.
- Soltan, D. G., das Neves, P., Olvera, A., Savastano Junior, H., & Li, V. C. (2017). Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. *Industrial Crops and Products*, 103, 1–12. Doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.016.
- Sgarbossa, A., Costa, C., Menesatti, P., Antonucci, F., Pallottino, F., Zanetti, M., Grigolato, S., Cavalli, R. (2014). Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters. *Fuel*, 137(2014), 70-76. Doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.080.
- Spanhol, A., Nones, D. L., Kumabe, F. J. B., & Brand, M. A. (2015). Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em santa catarina para a geração de energia. *Floresta*, 45(4), 833–844. Doi.org/10.5380/ufv.v45i4.37950.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI] (1985). TAPPI T 257 cm-85. Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: TAPPI.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry [TAPPI] (1997). TAPPI T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI, 1997.
- Tenorio, C., Moya, R., Filho, M. T., & Valaert, J. (2015). Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets. *Fuel Processing Technology*, 132, 62–73. Doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.040.
- Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg, S., Vadlani, P., Pei, Z. J., & Wang, D. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325–332. Doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014.

- Tolosana, E. (2009). Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid. FUCOVASA/ Mundi-prensa. 348 p.
- Toscano, G., Duca, D., Amato, A., Pizzi, A. (2014). Emission from realistic utilization of wood pellet stove. *Energy*, 68(5), 644–650.
- Tsoumis, G. (1991). Wood under microscope. Science and Technology of Wood Structure, Properties, Utilization.
- Tubeileh, A., Rennie, J., Goss, J. (2016). A review on biomass production from C 4 grasses: yield and quality for end-use. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 172–180.
- Tumuluru, S., Wright, C., Hess, R., Kenney, K. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707.
- Van Der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., Ptasiniski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748-3762.
- Vargas-Moreno, J. M., Callejón-ferre, A. J., Pérez-alonso, J., & Velázquez-martí, B. (2012). A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3065–3083. Doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.054.
- Vassilev, S., Vassileva, C., Vassilev, V. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158, 330-350.
- Velázquez-Martí, B., Sajdak, M., López-cortés, I., & Callejón-ferre, J. (2014). Wood characterization for energy application proceeding from pruning *Morus alba* L ., *Platanus hispanica* Münchh . and *Sophora japonica* L . in urban areas. *Renewable Energy*, 62, 478–483. Doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.010.
- Villanueva, M., Proupín, J., Rodríguez-Añón, A., Fraga-Grueiro, L., Salgado, J., & Barros, N. (2011). Energetic characterization of forest biomass by

- calorimetry and thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104(1), 61–67. Doi.org/10.1007/s10973-010-1177-y.
- Vital, B. R., Carneiro, A. D. C. O., & Pereira, B. L. C. (2013). Qualidade da madeira para fins energéticos. In F. Santos, J. Colodette, & J. H. de Queiroz (Eds.), *Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais* (pp. 321–354). Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa.
- Wahid, R., Nielsen, F., Hernandez, M., Ward, J., Gislum, R., Jørgensen, U., Møller, B. (2015). Methane production potential from *Miscanthus sp.*: effect of harvesting time, genotypes and plant fractions. *Biosystems Engineering*, 133, 71–80.
- Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, Khalil, R., Czégény, Z., Jakab, E., Barta, Z., & Grønli, M. (2018). Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark. *Applied Energy*, 227, 137–148. Doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.024.
- Wang, Q., & Shogren, F. (1992). Characteristics of the crop-paulownia system in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 39, 145–152.
- WHO - World Health Organization. Dioxins and their effects on human health. June 2014. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/en/>.
- Wilk, M., Magdziarz, A., Gajek, M., Zajemska, M., Jayaraman, K., & Gokalp, I. (2017). Combustion and kinetic parameters estimation of torrefied pine, acacia and *Miscanthus giganteus* using experimental and modelling techniques. *Bioresource Technology*, 243, 304–314. Doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.116.
- Xia, X., Zhang, K., Xiao, H., Xiao, S., Song, Z., & Yang, Z. (2019). Effects of additives and hydrothermal pretreatment on the pelleting process of rice straw: Energy consumption and pellets quality. *Industrial Crops and Products*, 178–184. Doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.007.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of

- hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. Doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013.
- Zanuncio, A. J. V., Nobre, J. R. C., Motta, J. P., & Trugilho, P. F. (2014). Química E colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Mill ex maiden termorretificada. *Revista Arvore*, 38(4), 765–770. Doi.org/10.1590/S0100-67622014000400020.
- Zanuncio, A. J. V., Farias, E. de S., & da Silveira, T. A. (2014a). Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Floresta e Ambiente*, 21(1), 85–90. Doi.org/10.4322/floram.2014.005.
- Zattera, J., Bianchi, O., Zeni, M., & Ferreira, C. (2005). Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila - EVA. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 15(1), 73–78. Doi.org/10.1590/S0104-14282005000100016.
- Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiwicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., & Obidziński, S. (2020). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997–1003. Doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051.
- Zhaohui, W., Zehui, W., Xigen, R. (2004). Studies on radial variation in density of moso bamboo using X-ray scanning. *Scientia Silvae Sinica*, 40, 111–116.