

CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE LA COSECHA Y
TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE LA MADERA DE PINO RADIATA D. DON

JUAN SEBASTIÁN VECINO MANTILLA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2012

CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE LA COSECHA Y
TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE LA MADERA DE PINO RADIATA D. DON

JUAN SEBASTIÁN VECINO MANTILLA

Trabajo de Grado Presentado como Requisito para
Optar al Título de Ingeniero Químico

Directores

MSc. René Carmona Cerda

PhD. María Paola Maradei García

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, doy gracias a **Dios** por tantas bendiciones durante estos 22 años de vida, por llevarme siempre de la mano como un papá lo hace con su hijo, cuidándome siempre de todo mal y peligro, por la vida, la salud, la familia y los amigos.

A mis padres **Héctor** y **Gloria**, por sus grandes enseñanzas de vida, su apoyo incondicional y su educación dentro de una familia con valores cristianos, que gracias a ellos soy el hombre de bien que sale a luchar en esta sociedad difícil de hoy día, los quiero.

A mis hermanos **Camilo**, **Silvia**, **Margarita** y **Lucía**, por los buenos ratos de alegrías y peleas que han hecho interesante el diario vivir de cada uno de los años que he compartido con ustedes, no hay hermanos como ustedes en ningún lugar del mundo, los quiero.

A mis preciados amigos **Julián**, **Liliana**, **Liseth** y **Zulma**, por estos 5 años de amistad incondicional, de locuras sin límites, de eternos trasnochos, de injusticias compartidas, de logros alcanzados, de innumerables historias que espero recordar siempre, nunca cambien loquillos, los quiero.

A mis compañeros y amigos de semestre, ellos saben muy bien quienes son, por todo lo vivido estos 5 años académicos, por lo que viene y porque nunca se pierda el vínculo, recuerden que somos los mejores de los mejores, los quiero.

A la escuela de Ingeniería Química en especial a los profesores **Fernando Viejo**, **Debora Nabarlatz**, **Paola Maradei** y **Gilles Gauthier** por sus enseñanzas y su gran ejemplo, siempre la humildad del ser humano por delante sin importar la

cantidad de títulos, hace falta muchos como ustedes, que orgullo haber sido su estudiante, los quiero.

A mi casi hermano **Elkin Muñoz** por su valiosa amistad desde tiempos inmemorables, su apoyo incondicional y los buenos ratos compartidos, un amigo para atesorar, lo quiero.

A Chile entero, en especial al profesor **René Carmona** por haberme dado la oportunidad de vivir una experiencia única en su país, por ser mi padre adoptivo durante mi estadía allá, por guiarme en el camino del aprendizaje, por su amistad y por los grandes recuerdos que tengo junto a él y su familia que es como la mía, los quiero.

A la señora **Margot, Claudio, Rodrigo, Diana, Kurt y Viviana**, que hicieron de mi estadía en Chile un recuerdo de nunca olvidar, madre, hermano, amigos, compañeros, se les llevará siempre en el corazón, que ojalá el día del reencuentro no sea tan lejano, los quiero.

A las demás personas que forman parte de mi vida, por su apoyo y su confianza aquí la prueba de una meta alcanzada, de una etapa culminada y de un nuevo capítulo que comienza, los quiero.

A Dios ante todo por ser mi guía, amigo y confidente.

A mis padres, hermanos, familiares, amigos, profesores y compañeros por su apoyo, por enseñarme que todo se aprende, que todo esfuerzo al final tiene su recompensa pero que no todo es trabajo , también hay que descansar.

Y “a esa rosa, donde quiera que esté, con la esperanza de hallarla algún día o de dejarme hallar por ella”

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. SITUACIÓN ENERGETICA DE CHILE	18
1.2. <i>Pinus radiata</i> D. Don	19
1.3. CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	21
1.3.1. Análisis Físico	21
1.3.2. Análisis Químico	22
1.3.3. Análisis Energético:.....	24
2. METODOLOGÍA	25
2.1. Muestreo de Biomasa Residual.....	25
2.2. Análisis Físico.....	26
2.3. Análisis Químico	27
2.4. Análisis Energético	30
2.5. Análisis Estadístico.....	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
3.1. Resultados Análisis Físico, Químico y Energético	31
4. CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Extraíbles de la biomasa	29
Tabla 2 Abreviación de las muestras en estudio	31
Tabla 3 Densidad básica	31
Tabla 4 Contenido de humedad y densidad aparente	32
Tabla 5 Composición elemental del material en estudio [%p]	35
Tabla 6 Componentes inorgánicos (elementos mayores)	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Matriz Energética de Chile	19
Figura 2 Distribución del Pinus radiata D.Don en Chile	20
Figura 3 Metodología de caracterización de biocombustibles sólidos.....	25
Figura 4 Zonas y Materiales de Muestreo Pinus radiata.....	26

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1 Análisis próximo y poder calorífico	33
Grafica 2 Influencia de la lignina y extraíbles en el poder calorífico	34
Grafica 3 Análisis componentes de madera y corteza	37

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 FICHA TÉCNICA DEL PINUS RADIATA D. DON.....	48
Anexo 2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PODER CALORÍFICO.....	49
Anexo 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO CARBONO, HIDRÓGENO, OXÍGENO.....	50
Anexo 4 ANÁLISIS DE INORGÁNICOS (ELEMENTOS MENORES).....	53
Anexo 5 VALORES TÍPICOS DE ELEMENTOS	54

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA RESIDUAL DE LA COSECHA Y TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE PINO RADIATA D. DON¹

AUTOR: JUAN SEBASTIÁN VECINO MANTILLA²

Palabras clave: Pino radiata, desecho, energía, termoquímico, bioquímico

Chile carece y depende en gran medida de fuentes energéticas de origen fósil como petróleo, carbón y gas natural pero es inmensamente rico en fuentes renovables de energía que debido a la falta de inversión no han sido ampliamente explotadas. Dentro de este último grupo constituyen una potencial fuente energética los desechos procedentes del sector forestal (cosecha e industria), en especial de pino radiata, debido a la gran cantidad de material residual que se generan anualmente durante su cosecha y aprovechamiento y que no se le está dando un adecuado uso. De ahí que la caracterización de residuos forestales de esta especie arbórea no nativa a partir de una metodología de análisis basada en determinaciones de los parámetros de interés, como análisis físico, químico y energético, proporciona información que permita dar un adecuado manejo a esta clase de material y adicionalmente definir su verdadero potencial como biocombustibles ya sea empleando métodos combustión, gasificación, pirolisis o incluso la fermentación. En este caso las muestras de cortezas fueron las que mejores resultados tuvieron en cuanto a lignina, extraíbles, contenido de carbono y poder calorífico haciéndolas posiblemente más aptas para transformación termoquímica mientras que las maderas tuvieron mejores resultados en cuanto al contenido de celulosa encaminando su uso a la producción de alcohol a partir de métodos de transformación bioquímica.

¹Tesis de Grado

²Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores MsC. René Carmona. PhD. María Paola Maradei García.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF RESIDUAL BIOMASS FROM HARVESTING AND PRIMARY PROCESSING OF RADIATA PINE (PINUS RADIATA D. DON)¹

AUTHOR: JUAN SEBASTIÁN VECINO MANTILLA²

Key Words: : radiata pine, waste, energy, thermochemical, biochemical

Chile strongly suffers from a lack of fossil energy sources like oil, coal and natural gas but the country is immensely rich in renewable sources that, due to underinvestment, have not been widely exploited. Within the latter, forest waste (harvesting and industry) constitutes a potential energy source, considering especially radiata pine, due to the large amount of wastes generated per year and that is not being recycled. Hence, using a methodology based on the determination of several parameters of interest (*i.e.* physical, chemical and energetical), forest residues characterization of this non-native tree can provide information needed to give an adequate management of this kind of material and further define its true potential as a biofuel for combustion, gasification, pyrolysis or fermentation. In our case, bark samples gave the best results considering lignin, extractives, carbon content and heating value, making them possibly more suitable for thermochemical conversion, while wood had better results in terms of cellulose content, making them useful for the production of alcohol from biochemical transformation methods.

¹Thesis

²Chemical Engineering Department. Advisors MsC. René Carmona. Codirector PhD. María Paola Maradei García.

INTRODUCCIÓN

“La necesidad de energía y por lo tanto de hacer uso de alguna fuente energética es inherente a la condición del ser vivo”. Esta actitud, se ha hecho más compleja en la especie humana por el sinnúmero de actividades que tiene que realizar para satisfacer sus requerimientos biológicos, sociales, económicos, culturales y tecnológicos (CONAMA, 2010, pág. 67), que a lo largo de la historia ha ido desarrollando pero que actualmente lo ha llevado a un punto crítico que exige una pronta y eficaz solución (crisis energética).

Ciertamente, Chile como foco de inversión y progreso en América Latina no ha estado ajeno al desarrollo progresivo, que desde el periodo colonial hasta la actualidad, ha experimentado el proceso de consumo de energía (CONAMA, 2010, pág. 68). Sin embargo, a diferencia de otros países, Chile se ha cimentado sobre políticas gubernamentales no apropiadas y fuentes primarias de energía poco diversificadas, algunas de ellas dependientes del clima como la hidráulica, mostrando con el tiempo un aspecto de gran preocupación para la población del país: el déficit en la seguridad energética (Jain, 2010, pág. 6).

Es así como la matriz energética chilena está cubierta en gran medida por fuentes extranjeras, pues al carecer de los recursos primarios que representan las fuentes de energía más importantes de hoy en día (petróleo, carbón y gas natural), el país ha tenido que acudir a un mercado externo, generando mayor inestabilidad en cuanto a precio y suministro (Jain, 2010, pág. 5).

En vista de esas razones, se hace necesario implementar en Chile la búsqueda de alternativas viables con miras a encontrar la mejor combinación de fuentes de energía para cubrir sus necesidades de crecimiento de una manera confiable, menos dependiente, sostenible y a un costo razonable para todos sus ciudadanos. (Ministerio de Energía Gobierno de Chile, 2008)

Puesto que el sector forestal es uno de los más importantes del país, con un total de 33,8 millones de hectáreas aptas para la actividad forestal, de las cuales 15,6 millones son áreas productivas distribuidas entre plantaciones forestales y bosque nativo (Bertran & Morales, 2008, pág. 20) cuya producción aportan el 3,1% del PIB nacional (CORMA, 2010) y generan grandes cantidades de metros cúbicos de desechos brutos capaces de producir entre 3.073 y 6.173 MW de potencia eléctrica instalable (Pontt, 2008), poniendo entonces en evidencia que la salida a la problemática energética de Chile está en las energías renovables no convencionales, especialmente, en la utilización de biomasa residual.

Un caso particular es el pino radiata (*Pinus radiata* D.Don) que se posiciona como la especie arbórea no nativa más importante del país ya que actualmente posee 1,4 millones de hectáreas, sembradas entre las regiones V y X (Bertran & Morales, 2008, pág. 13), explotadas para la obtención industrial de pulpa, madera aserrada, tableros, astillas y otros y el cual a lo largo de todas las etapas de tratamiento forestal, cosecha, transformación y aprovechamiento, se obtiene, además de un producto elaborado, cantidades considerables de biomasa residual, que si bien es cierto alguna parte ha sido usada como materia prima para combustible en plantas cogeneradoras de energía, aún falta mucho para que todo su desecho sea realmente aprovechado.

Sumado a lo anterior, es poca o casi nula la información física, química y energética disponible de esa materia orgánica y su variación según procedencia geográfica.

Por eso, la presente investigación pretende ser parte de las pioneras en la búsqueda, recolección y análisis de los residuos forestales de pino, con la finalidad de hacer comparaciones, emitir juicios y sacar conclusiones, para que así, Chile evalúe el potencial de esta alternativa e implemente su uso como una opción viable y eficiente para la producción energética.

1. MARCO TEÓRICO

La disposición, explotación y consumo de los recursos energéticos han sido, desde siempre, factores importantes en el desarrollo de los pueblos y naciones de todo el mundo, sobre todo si se trata de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural que, desde los inicios de la era industrial hasta tiempos modernos, se han consolidado como las principales fuentes de energía debido a su facilidad en la extracción, transporte y transformación (CER, 2010).

Ciertamente, el uso de los recursos energéticos primarios trajo consigo durante muchos años los beneficios de la generación de electricidad, calor e incluso las facilidades para el transporte, sin embargo, últimamente se ha evidenciado que sus reservas no son fuentes perpetuas de energía y la escasez, debido su abuso desmedido, han hecho caer al mundo en las conocidas crisis energéticas (CER, 2010). Además, el consumo excesivo de esta clase de combustibles también ha provocado drásticos cambios ambientales apreciables a nivel global (IPCC, 2008, pág. 2). Ambas situaciones señalan hacia una misma dirección: la búsqueda de alternativas de energía más sustentables y amigables con el medio ambiente.

En este sentido, las nuevas energías como la fisión nuclear o las celdas de combustible, la optimización en el rendimiento de las tecnologías actuales y la mejora e implementación de las energías renovables no convencionales (ERNC) se plantean como posibles soluciones a las problemáticas energética y climática que se viven hoy (Senovilla & Antolín, 2005).

Particularmente, las ERNC como la solar, geotérmica, eólica, biomásica, hídrica o mareomotriz, son fuentes de energía que se caracterizan principalmente porque durante su proceso de transformación y adecuado aprovechamiento en energía

útil son inagotables ya sea por la inmensa cantidad de energía o por su capacidad natural de regenerarse (Jara, 2006, pág. 14).

A pesar de que existen fuertes discusiones sobre su disponibilidad intermitente o lento desarrollo, el uso de las ERNC combinado con el uso inteligente de la energía podrán suplir, al menos, la mitad de las necesidades energéticas del mundo para el 2050 (EREC & Greenpeace International, 2008, pág. 7) convirtiéndose en una tentadora posibilidad de inversión para algunos y de progreso, para otros.

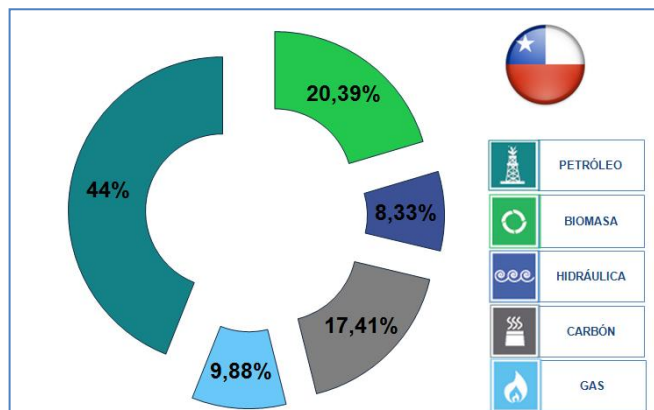
1.1. SITUACIÓN ENERGETICA DE CHILE

Durante los últimos 20 años, Chile se ha posicionado como uno de los países latinoamericanos con más alto índice de desarrollo humano (IDH: 0,805 en 2011) (UNDP, 2011, pág. 131), es decir, sus logros en cuanto a salud, educación y estándar de vida han ido creciendo significativamente.

Este rápido desarrollo ha estado ligado principalmente al aumento en la demanda y el consumo energético por parte de la población y el sector industrial (Jain, 2010, pág. 8). Sin embargo, gran parte de los mega watts anuales utilizados a nivel nacional provienen de fuentes fósiles que no integran los recursos propios del país, situación que derivó en políticas gubernamentales de importación de hidrocarburos para suplir esta necesidad (Napadensky, 2010).

Es así como la poco diversificada matriz energética chilena (Figura 1) depende de cerca de dos tercios de los recursos energéticos primarios de otros países (petróleo, carbón y gas) (CNE , 2011) en un mercado extranjero cada vez más inestable que amenaza e impide algún grado de mejora en la seguridad energética que ha venido afectado al país por décadas.

Figura 1 Matriz Energética de Chile



Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la CNE

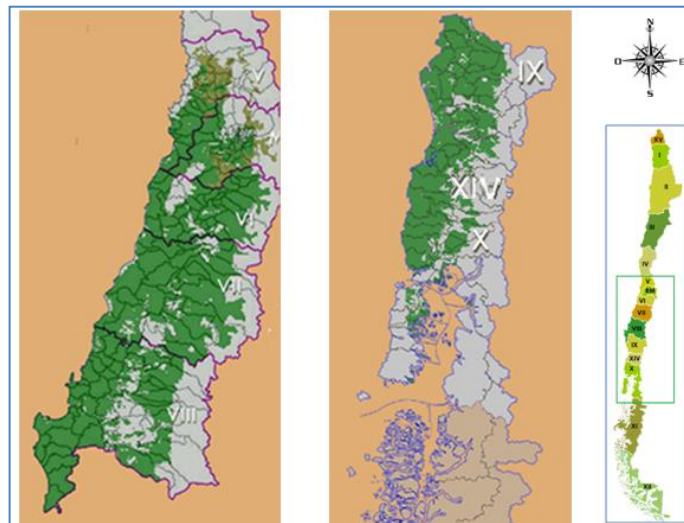
Por dichas razones, muchas personas, entre ellas el director del Centro para Estudios Energéticos de la Universidad Austral, coinciden en que “Chile carece de una política energética seria y responsable” (Wittelsbürger, 2007, pág. 35) y es el momento de que el país evalúe seriamente el avance hacia una matriz energética más diversificada y cuyo principal objetivo sea tener un abastecimiento más seguro. De hecho, aunque el país carece de recursos fósiles, es inmensamente rico en fuentes renovables de energía (Programa Chile Sustentable, 2004, pág. 15) especialmente la proveniente de la biomasa residual del sector forestal, posicionándola como una alternativa energética viable, eficiente y recientemente tomada en cuenta como foco importante de desarrollo dentro de los nuevos lineamientos energéticos con proyecciones al 2030 (CER, 2010).

1.2. *Pinus radiata* D. Don

La industria forestal es uno de los pilares de la economía chilena, aportando con el 3,1% del PIB nacional y más del 13% de las exportaciones (CEPAL, 2005, pág. 33), cifras que han permanecido relativamente estables durante la última década y cuyos principales productos derivan de las plantaciones de Eucalipto y Pino radiata.

Esta última especie arbórea no nativa (ver anexo 1), se ha consolidado como una de las más importantes del país debido a la facilidad de adaptación a las condiciones climáticas y del suelo, y a la cantidad de productos que de ella se obtienen (madera aserrada, pulpa mecánica y química, tableros de fibra o de partículas, chapas, variedad de papel, entre otros). De ahí, que su distribución sea tan extensa, pues alrededor de 1 457 224 hectáreas, que representan el 63,4% del total de bosques plantados, son de pino desplegándose a lo largo del secano costero, interior y precordillerano de la V región de Valparaíso hasta la X región de Los Lagos (Figura 2) (INFOR, 2008).

Figura 2 Distribución del *Pinus radiata* D. Don en Chile



Fuente: Sistema de Gestión Forestal Chile

Sin embargo, durante toda su cadena productiva (tratamientos silvícolas como podas y raleos, la cosecha y la industria transformadora) parte importante de estos recursos madereros (4,5 millones de m³) se pierden en forma de residuos (ramas, arboles y trozos defectuosos, copas, corteza, lampazos, aserrín, viruta, despuntes, astillas, tapas y otros) (Bertran & Morales, 2008, pág. 41).

Tal cantidad de biomasa, es escasamente aprovechada por algunas industrias dentro de sus plantas generadoras de energía (calderas) muchas veces, sin

ningún tipo de control del material que ingresa debido a la reducida información física, química y energética disponible de esta clase de residuos, especialmente del Pino radiata procedente de las mencionadas regiones.

Ciertamente, la biomasa residual del sector forestal, se encuentra internacionalmente reconocida como la mayor fuente potencial de energía renovable (Lopez *et al*, 2010, pág. 76) y es ahí donde Chile, mediante el uso de residuos de Pino, tiene la oportunidad de fortalecer su matriz energética, pues a partir de un mismo material es posible producir conjuntamente energía térmica y eléctrica por métodos termoquímicos como la combustión directa o la producción de biogás o etanol por métodos bioquímicos (Melendez *et al*, 2006, pág. 16).

1.3. CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

La caracterización de las propiedades de algún residuo forestal proporciona gran información para un adecuado manejo y adicionalmente permite definir, de manera más precisa, su verdadero potencial como biocombustible. Para lo cual se han desarrollado métodos de análisis, basados en determinaciones individuales de los parámetros de interés.

Básicamente, esta metodología se puede dividir en 3 tipos de análisis, cada uno de ellos compuesto por diversas propiedades a determinar:

1.3.1. Análisis Físico

Contenido de Humedad (%CH): En biocombustibles sólidos es un factor muy variable que depende de la especie, la zona geográfica y las condiciones ambientales. Hace referencia al contenido de agua por unidad de masa de material residual. Si se opta por la obtención de energía a través de métodos

termoquímicos, altos %CH significarán una reducción significativa de la energía aprovechable de esa biomasa (Nogués *et al*, 2010, pág. 132).

Densidad Aparente (DA): Básicamente se define como el peso por unidad volumétrica del material sólido y la fase fluida (aire) que incorpora (Nogués *et al*, 2010, pág. 144). Así, una baja densidad aparente desfavorece la relación de energía por unidad de volumen y adicionalmente involucra una mayor capacidad de almacenamiento y transporte, complicando y elevando significativamente los costos de operación. En muchos casos es más práctico densificar el material elaborando pellets o briquetas (Subero, 2010, pág. 26).

Densidad Básica (DB): Relaciona el peso mínimo o seco del material y su volumen máximo, es decir en equilibrio con el agua tal como si estuviera en el árbol. Su utilidad radica en la información directa de la cantidad de material teórico a obtener. Cabe señalar que está muy relacionada con el clima, la edad, la especie y la silvicultura (Navarrete & Espinoza, 2011, pág. 262).

1.3.2. Análisis Químico

Análisis Próximo o Inmediato (AP): Consiste en un ensayo estandarizado que determina la distribución de productos obtenidos al quemar una muestra de combustible. A partir del AP es posible conocer el material volátil que consiste en gases y vapores (H₂, CO₂, CO, CH₄, NH₃, H₂O, sulfuros, benceno, tolueno, alquitranes, otros) expulsados durante la pirolisis; el carbono fijo o fracción no volátil del material y por último las cenizas o inorgánicos remanentes de la combustión. Así, este análisis permite identificar, previamente, los posibles equipos a utilizar, su eficiencia, la facilidad de ignición del material y las repercusiones directas sobre el poder calorífico si se opta por la obtención de energía usando métodos termoquímicos (Speight, 2005, pág. 41).

Análisis Último o Elemental (AU): Es una técnica de análisis que envuelve la determinación del contenido en peso de los elementos orgánicos (C, H, O, N), azufre y cloro que constituyen el combustible (Speight, 2005, pág. 67). Su importancia se debe al uso de esa información en los balances de materia y energía, en la obtención del poder calorífico, en las repercusiones ambientales (Subero, 2010, pág. 14) y en el desempeño de los equipos de combustión.

Análisis de Componentes (AC): Los principales componentes del material lignocelulósico son las macromoléculas que forman la pared celular como la celulosa, la lignina y las poliosas y aquellas moléculas de menor peso molecular como los extraíbles y sustancias minerales (Fengel & Wegener, 1983, pág. 26) que se encuentran en el lumen, ductos especializados y espacios intercelulares.

La celulosa es un homopolímero de β -D-Glucosa, que representa en la madera el componente mayoritario y cumple funciones de protección celular y estructural en la planta. Su potencial radica en la obtención de combustibles líquidos mediante la fermentación de azúcares en etanol, previo a un tratamiento de trituración, pirólisis, explosión de vapor, organosolventes, líquidos iónicos u otros que tiene el objetivo de dejarla disponible (libre de otros componentes como la lignina) para el proceso bioquímico (Stroeve *et al*, 2009, pág. 3714).

La lignina también es una macromolécula compleja, compuesta por un sistema reticulado de unidades fenólicas (coniferil, sinapil y p-cumaril alcohol) presente principalmente en la pared primaria de la célula cumpliendo funciones estructurales, de protección y aislamiento (Stroeve *et al*, 2009, pág. 3714). Tiene gran potencial como materia prima para la obtención de diversos productos tales como mezcla de tolueno con benceno y xileno (BTX), aceites de pirólisis, fibras de carbono y muchos otros (Lehnen, 2009).

La hemicelulosa (poliosas) es un heteropolisacárido compuesto principalmente por ácidos urónicos y 5 diferentes azúcares: glucosa, manosa y galactosa (hexosas), xilosa y arabinosa (pentosas). Además, de tener una función estructural en conjunto con la celulosa y la lignina, también actúa como fuente de reserva de carbohidratos, especialmente en las semillas (Fitzpatrick, 2011, pág. 41).

Inorgánicos: La presencia de estos elementos en la biomasa es muy baja pues sus requerimientos biológicos en actividades metabólicas son mínimos pero indispensables. Es necesario conocer cualitativa y cuantitativamente su presencia en los residuos forestales, sobre todo si dicho material será utilizado como fuente de energía en procesos termoquímicos con el fin de hacer estimaciones del contenido de las emisiones al ambiente y su comportamiento en los hogares de caldera y otros equipos de conversión.

Los inorgánicos se pueden dividir en 2 grandes grupos:

- Elementos mayores como Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, Si.
- Elementos menores como Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Hg y otros.

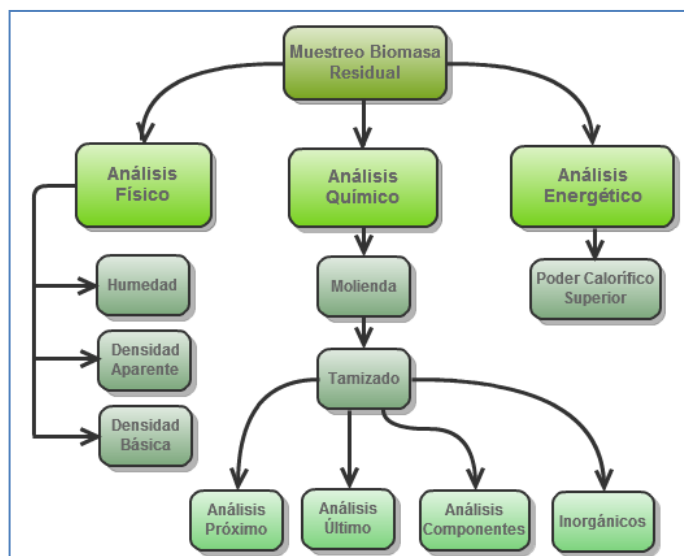
1.3.3. Análisis Energético:

Poder Calorífico (PC): Este análisis consiste en determinar la cantidad de energía liberada cuando se quema por completo una masa unitaria de material en condiciones normalizadas. De esta forma, se produce la transformación inmediata de la energía química almacenada en la biomasa, en energía calórica. Si se tiene en cuenta el aporte energético debido al calor latente por condensación del vapor formado se conoce como Poder Calorífico Superior (PCS), si no, Poder Calorífico Inferior (PCI) (Nogués *et al*, 2010, pág. 142).

2. METODOLOGÍA

En el estudio de la caracterización de los residuos del *Pinus radiata* para su aprovechamiento energético se desarrolló una metodología de trabajo fundamentada en 4 grandes grupos de tareas o actividades como lo representa la figura 3. Debido a la similitud existente entre las normas ASTM y las TAPPI para estos procedimientos, el laboratorio de energías renovables (NREL) no es muy estricto con respecto a cuál de ellas utilizar (NREL, 2011), por lo que se trabajó con las primeras.

Figura 3 Metodología de caracterización de biocombustibles sólidos



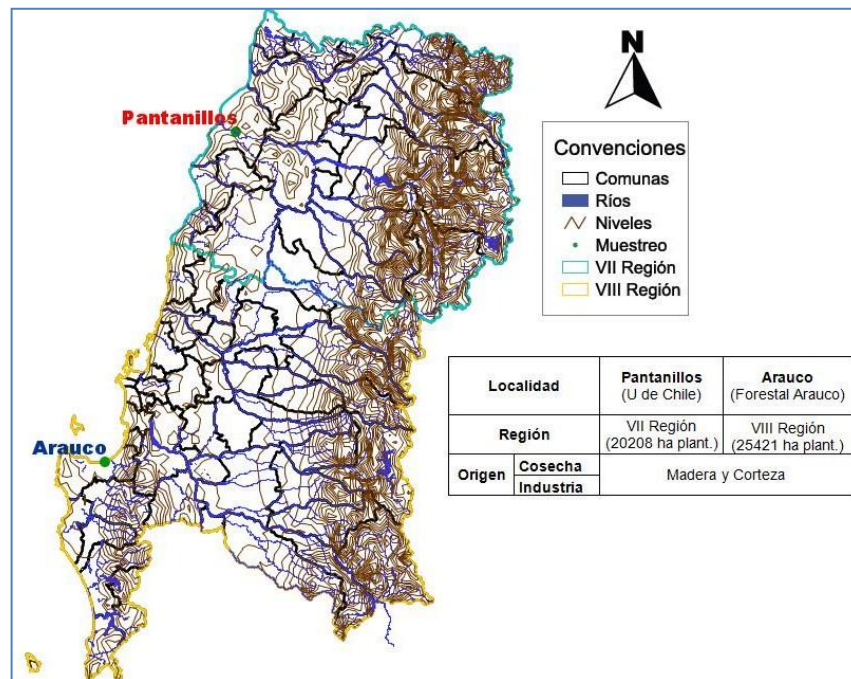
Fuente: Autor

2.1. Muestreo de Biomasa Residual

Previo a todos los análisis y casi terminada la temporada invernal (septiembre), se realizó la recolección de muestras representativas de maderas vírgenes (sin ningún tipo de tratamiento químico) de los residuos de la cosecha e industria forestal del pino radiata del secano costero de 2 importantes regiones plantadas con la especie en Chile, la VII región del Maule y de la VIII región del Biobío.

El muestreo de residuos se realizó en material de pino de alrededor de 25 años, de la forma como lo muestra la figura 4 y según las especificaciones técnicas europeas (UNE-CEN/TS 14778-1:, 2007) y (UNE-CEN/TS 14778-2, 2007).

Figura 4 Zonas y Materiales de Muestreo Pinus radiata



Fuente: Autor

2.2. Análisis Físico

Para este primer análisis no se hizo ningún tipo de pretratamiento al material muestreado, se trabajó con las mismas condiciones en que fue traído de terreno.

Inicialmente y de forma simultánea, se realizó el cálculo del contenido de humedad y la densidad aparente como lo indican las normas (ASTM E871-82 (2006)) y (CEN/TS 15103, 2005). La primera se determina por diferencia de peso de la muestra antes y después de ser sometida a condiciones controladas de temperatura (103 ± 2 °C) hasta alcanzar un valor constante. Para la segunda propiedad, se utilizó un contenedor cilíndrico estandarizado (volumen y peso

conocido), el cual se llenó completamente y al ras de material para ser pesado posteriormente; y por diferencia calcular su masa. Esta última propiedad se determinó para la biomasa en su conjunto (madera y corteza).

Luego, se determinó la densidad básica, saturando con agua sólo probetas de madera de ambas regiones para de esta forma conocer su volumen húmedo máximo por desplazamiento de agua. Después, las mismas probetas se secaron para determinar su peso anhidro.

2.3. Análisis Químico

En esta tercera etapa de caracterización fue necesario que al material se le realizara un pretratamiento. Para eso, se hizo una reducción de tamaño con ayuda de un astillador y posteriormente con un molino de laboratorio Wiley.

Teniendo el material con una granulometría más reducida, se clasificó por tamaños con ayuda de un tamiz (0,1 0,25 y 0,4 mm). Para todos los análisis posteriores se empleó el material de 0,25 mm.

En el análisis próximo se emplearon las normas (ASTM: D 3172-07a) (ASTM: D 3174-11) y (ASTM: D 3175-11). Se pesaron 2,5 g de material seco en crisoles herméticamente sellados con tapas con el fin de evitar el contacto con el oxígeno. Después, en una mufla de calcinación a una temperatura de 900°C y por 7 minutos, se llevó a cabo el proceso de pirólisis donde los volátiles se desprendieron del material, quedando en los crisoles únicamente el carbono fijo. Luego, se combusionó el material a 580°C por 1 hora para obtener finalmente las cenizas. Los volátiles se calcularon por diferencia como lo muestra la ecuación 1:

$$\%Volatiles = 100 - \%CarbonoFijo - \%Cenizas \quad (1)$$

Con la información anterior, se hicieron las determinaciones correspondientes al análisis último como lo describen Parikh y su grupo de investigación (Parikh, et al, 2007) con las ecuaciones (2), (3) y (4)

$$C = 0,637CF + 0,455MV \quad (2)$$

$$H = 0,052CF + 0,062MV \quad (3)$$

$$O = 0,304CF + 0,476MV \quad (4)$$

Para conocer el contenido de azufre se utilizó la técnica de espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente ICP-OES con un equipo Perkin Elmer Optima 3300 XL y el nitrógeno por diferencia entre el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre.

El contenido de inorgánicos se obtuvo con ayuda de fluorescencia de rayos X (XRF) usando un equipo Bruker S1 Turbo SD LE y la técnica ICP-OES, a excepción del de mercurio que se hizo con un mercuriómetro Milestone DMA-80.

Antes de hacer las determinaciones del análisis por componentes, fue necesario dejar libre el material de extraíbles con el fin de evitar errores por interferencia en las determinaciones de lignina, celulosa y hemicelulosa. Para eso se hicieron extracciones según las normas ASTM como lo muestra la tabla 1.

Ya con el material libre de extraíbles, se realiza la determinación de la lignina según Klason (ASTM D1106-96 (2007)). Este método consiste en una hidrólisis ácida de la biomasa. Primero se trata el material con H₂SO₄ al 72%v por 2 horas a una temperatura de 20°C para luego diluirlo al 3%v y dejarlo hervir durante 20 min. a 121°C en autoclave.

Tabla 1 Extraíbles de la biomasa

Extracción con	Sustancias que extrae	Método
Etanol-Tolueno (1:2)	Resinas, Grasas, Ceras, Aceites, Esteroles	Con soxhlet 4 horas según (ASTM D 1105-84)
Etanol	Taninos, Flobafenos, Estilbenos	Con soxhlet 4 horas según (ASTM D 1105-84)
Agua caliente	Proteínas, Alcaloides, Algunos Inorgánicos	Según (ASTM D 1110- 84)

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de Fengel y Wegener “Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions”, 1984, pág. 33.

La suspensión resultante se enfría para finalmente ser filtrada. El residuo sólido (lignina insoluble) se lava, se seca y se pesa. El residuo líquido (lignina soluble) se lleva al espectrofotómetro para medir su absorbancia a una longitud de onda de 205 nm y de esta forma conocer la concentración de lignina en el ácido. La lignina total es la suma de la lignina soluble y la lignina insoluble.

Siguiendo con el análisis de los componentes de la biomasa, se hizo la determinación de la holocelulosa por el método del clorito. (ASTM D 1104-56 (78)). Aquí, el material libre de extraíbles se trata con clorito de sodio (NaClO_2) en medio ácido (agua y ácido acético glacial) a $67^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ por 1 hora. Pasado este tiempo se repite el mismo procedimiento 3 veces.

Finalizadas la etapa de cloración, se procede a filtrar el material resultante y a lavar con abundante agua antes de secar y pesar.

Por último, se procede a realizar la determinación del porcentaje de celulosa a partir de la holocelulosa obtenida anteriormente y utilizando la norma (ASTM D 1103-60 (77)). El material es tratado con una solución acuosa de álcali fuerte (NaOH al 17,5%) durante 45 minutos a 20°C . Pasado este tiempo la solución alcalina se diluye hasta llegar a una concentración de 8,37%v la cual actuará

durante 1 hora más. Finalizada la etapa de tratamiento alcalino el material resultante se filtra y la fracción sólida (α -celulosa) se lava, se seca y se pesa.

2.4. Análisis Energético

En este cuarto y último análisis, la determinación del poder calorífico superior (PCS) se realizó con pellets de material seco según la norma (UNE-EN 14918:2009) usando un calorímetro Parr 6200.

Junto a los balances de masa y energía y el PCS, muchos autores desarrollaron correlaciones que permiten determinar teóricamente el poder calorífico inferior (PCI), cuya connotación en la transformación termoquímica de la biomasa es mucho más realista. La presente investigación utilizó la ecuación descrita por Eva López y Eva Llera (Nogués, Garcia, & Rezeau, 2010, pág. 142), ecuación 5.

$$PCI_0 = PCS_0 - \left(\frac{22,041 \times H}{1000} \right) \quad (5)$$

Donde el subíndice 0 indica que es en base seca, el H es la fracción másica de hidrógeno en el material y los poderes caloríficos están expresados como MJ/Kg.

2.5. Análisis Estadístico

Con el fin de conocer si existe alguna diferencia significativa de la información obtenida para el poder calorífico de ambas regiones se empleó el método ANOVA y la prueba de Holm-Sidak para comparaciones múltiples de promedios que viene preinstalado en el software SIGMAPLOT 11.0.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En total se analizaron 10 muestras, 5 por cada región de estudio y se hicieron 3 repeticiones por análisis. Asimismo y para una mayor facilidad a la hora de mostrar los resultados, a cada muestra le fueron asignadas 3 letras que representan la localidad, el tipo de material y el sector de donde procede (tabla 2).

Tabla 2: Abreviación de las muestras en estudio

Nombre Muestra	
Pantaniillos Mezcla Cosecha (Phc)	Arauco Mezcla Cosecha (Ahc)
Pantaniillos Corteza Cosecha (Pcc)	Arauco Corteza Cosecha (Acc)
Pantaniillos Corteza Industria (Pci)	Arauco Corteza Industria (Aci)
Pantaniillos Madera Cosecha (Pmc)	Arauco Madera Cosecha (Amc)
Pantaniillos Madera Industria (Pmi)	Arauco Madera Industria (Ami)

3.1. Resultados Análisis Físico, Químico y Energético

La importancia de la densidad básica radica en que permite determinar la cantidad de madera seca disponible de cierto volumen de desecho verde. Los resultados de dicha propiedad para las maderas se muestran en la tabla 3, encontrándose valores diferentes para las 2 localidades. Sin embargo, Radiata Pine Breeding Co Ltd en Nueva Zelanda publica que la madera de pino radiata puede presentar valores de densidad desde los 350 a 550 kg/m³ y cuya variación podría estar relacionada con la ubicación geográfica, fertilidad del terreno, el tratamiento silvícola e incluso a factores genéticos (RPBC, 2003).

Tabla 3: Densidad básica

Densidad Básica [kg/m ³]	Muestra	Prom.	Desv.
	Pmc	411,5	7,52
	Amc	381,6	8,60

Las determinaciones del contenido de humedad de la biomasa estudiada (tabla 4) arrojaron resultados relativamente altos (entre 55-189%) situación esperada

debido a la época en que se realizó el muestreo. Estos resultados indican que en todas las muestras, en especial las de Arauco, la cantidad de agua era mayor que la cantidad de material leñoso (corteza y madera), afectando negativamente su uso potencial y directo en métodos termoquímicos como combustión, gasificación o pirólisis, pero favoreciendo su aprovechamiento en métodos bioquímicos como la fermentación (McKendry, 2002).

Los resultados obtenidos para la densidad aparente (tabla 4) fueron bajos a pesar de la influencia directa del alto contenido de humedad, desfavoreciendo así, la relación de energía por unidad de volumen y elevando los costos de transporte y almacenamiento debido al incremento de la masa no útil (Agua).

Tabla 4: Contenido de humedad y densidad aparente

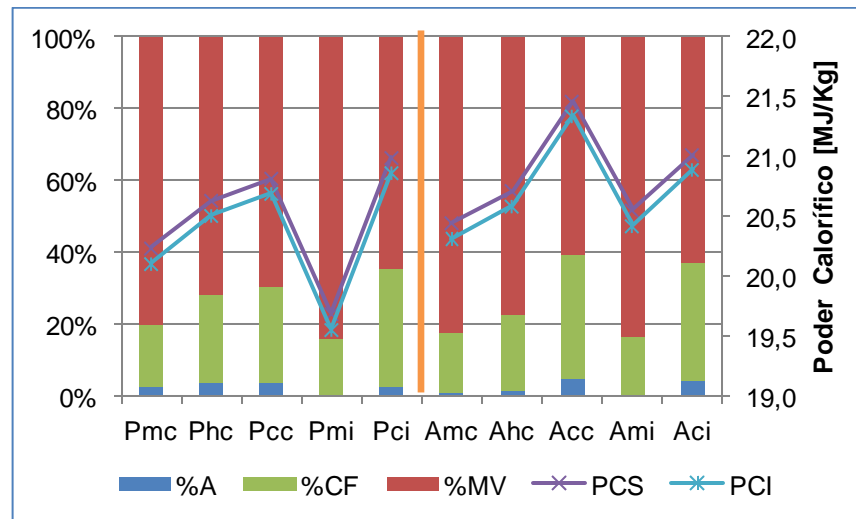
Muestra	Contenido de Humedad [%p]	Prom.	Desv.	Densidad Aparente [Kg/m ³]	Prom.	Desv.
Pmc		89,20	2,84		-	-
Phc		54,73	8,27		112,38	5,18
Pcc		108,19	9,84		-	-
Pmi		143,24	3,23		268,58	9,32
Pci		126,50	7,30		272,97	5,41
Amc		105,77	5,54		-	-
Ahc		90,30	2,48		152,41	5,32
Acc		73,86	5,13		-	-
Ami		189,07	5,52		201,08	2,78
Aci		104,17	7,57		191,80	7,75

En el grafico 1 se muestra el análisis próximo para cada muestra. En las maderas de ambas regiones y sectores, se observó que no existe una variación significativa del carbono fijo (%FC) con porcentajes entre 15,6 y 17,6%p y del material volátil (%MV) con valores entre un 80,1 y 83,9%p, pero sí de las cenizas (%A) cuyos porcentajes están entre 0,5 y 2,3%p, siendo la de mayor valor la muestra Arauco corteza cosecha (Acc).

Tampoco es posible apreciar variaciones considerables al comparar el análisis próximo realizado para las dos localidades de Chile con los resultados obtenidos

por la universidad de Newcastle en Australia, cuyos porcentajes en peso de volátiles, cenizas y carbono fijo fueron 84,6 0,4 y 13,9 respectivamente (Cetin *et al*, 2005).

Grafica 1 Análisis próximo y poder calorífico



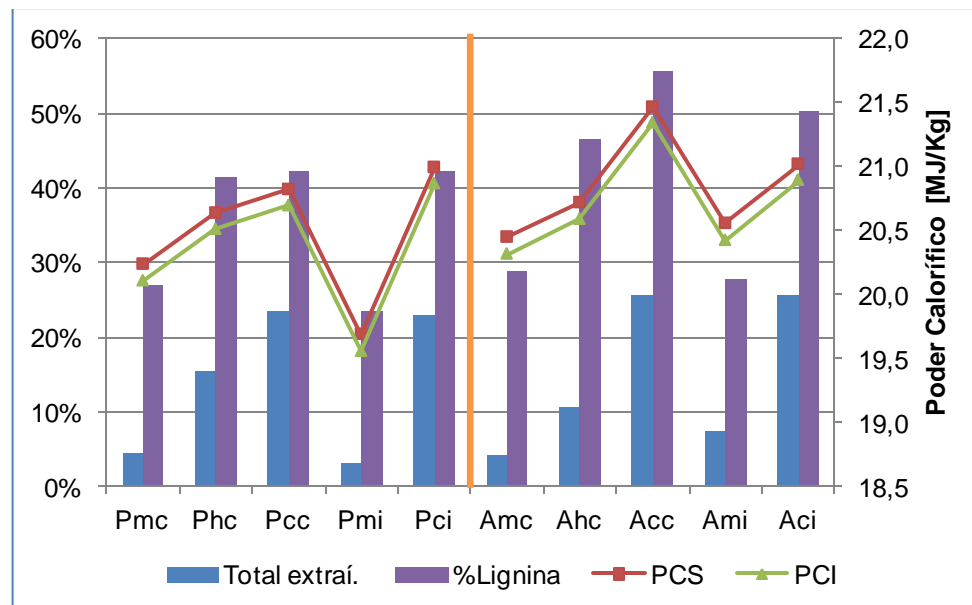
Para las cortezas, los porcentajes de material volátil fueron menores a los obtenidos para maderas; en cuanto a carbono fijo y cenizas resultaron mayores. La diferencia en las cenizas podría deberse a una posible contaminación con el medio circundante ya que es la capa más externa y expuesta del árbol.

A partir del análisis anterior es posible conocer las repercusiones directas sobre el poder calorífico (grafico 1). Para altos %MV (encima del 20%p), se tiende a disminuir el aporte energético debido al aumento de O y N que no son combustibles, alto %CF favorecen dicho aporte a diferencia de altos %A que tienden a disminuirlo pero no significativamente si hay altos %CF y bajos %MV que compensan ese aumento.

Es posible también observar una interesante variación de los poderes caloríficos con respecto al contenido de lignina y extraíbles (grafico 2), pues a mayor

cantidad, mayor va ser el aporte energético de ese material y viceversa. Así, las coníferas, como el *Pinus radiata*, tienden a tener mayor poder calorífico debido al alto contenido de lignina y resinas, componentes de la madera ricos en carbono e hidrógeno (Telmo & Lousada, 2009). Aún existe gran discusión con respecto a cuál de estos componentes tiene el mayor aporte energético total.

Grafica 2 Influencia de la lignina y extraíbles en el poder calorífico



Teniendo en cuenta las discusiones anteriores, los poderes caloríficos superiores tuvieron valores entre los 19,9 y 21,5 MJ/kg, resultados muy similares a los reportados en la CSIRO biofuel database de Australia cuyos valores están entre los 19,3 y 22,6 MJ/kg (Gedde, 2010, pág. 26). A partir de los resultados anteriores se determinaron los poderes caloríficos inferiores con valores entre 19,8 y 21,4 MJ/kg. Para ambas determinaciones calóricas los mejores y peores resultados fueron para Arauco corteza cosecha (Acc) y Pantanillos madera industria (Pmi) respectivamente.

Sumado a lo anterior, es posible afirmar estadísticamente (anexo 2), que las diferencias entre los poderes caloríficos de las maderas de ambas regiones, tanto

de industria como de cosecha, son significativas exceptuando Arauco madera industria (Ami) y Arauco madera cosecha (Amc) cuyos resultados son muy similares. Para el caso de las cortezas las diferencias fueron relevantes solo para Arauco corteza cosecha (Acc), Pantanillos corteza cosecha (Pcc), Arauco corteza cosecha (Acc) y Arauco corteza industria (Aci).

Siguiendo con los resultados de los análisis químicos, la tabla 5 muestra los porcentajes de la composición elemental de cada material en estudio.

Tabla 5: Composición elemental del material en estudio [%p]

	C	O	H	N	S	Cl	A
Amc	48,30	44,35	5,99	0,39	0,25	0,06	0,67
Ahc	48,63	43,23	5,89	0,29	0,34	0,06	1,56
Acc	49,51	39,43	5,56	0,22	0,39	0,06	4,83
Ami	48,17	44,61	6,01	0,12	0,51	0,07	0,51
Aci	49,65	40,05	5,62	0,44	0,17	0,06	4,01
Pmc	47,56	43,48	5,88	0,24	0,48	0,06	2,30
Phc	48,40	41,72	5,74	0,12	0,49	0,07	3,46
Pcc	48,73	41,29	5,71	0,15	0,46	0,06	3,60
Pmi	48,11	44,68	6,01	0,50	0,13	0,07	0,50
Pci	50,22	40,66	5,70	0,45	0,23	0,00	2,73

En general, las cortezas tuvieron mayor contenido de C, en especial las de la industria de ambas regiones (Aci y Pci), sin embargo las maderas de industria (Ami y Pmi) presentaron mayor contenido de H. Al hacer una comparación estadística se observa que existen diferencias significativas de contenido de C e H entre cortezas y maderas de las 2 localidades y sectores, exceptuando el C en Arauco madera industria y cosecha (Ami y Amc) y el H en Pantanillos corteza cosecha e industria (Pcc y Pci) (anexo 3). Los valores obtenidos de estos elementos permitirán conocer las cantidades de agua y CO₂ producidos si se quema cierta cantidad de ese material (Subero, 2010, pág. 15).

Los altos contenidos de nitrógeno, azufre y cloro podrían llevar a la producción de considerables cantidades de NO_x, SO_x y HCl, todos ellos conocidos precursores

de la lluvia ácida y daños severos a la capa de ozono. Incluso, la presencia de nitrógeno tiene efectos negativos en el poder energético del material y la presencia de azufre y cloro actúan como agentes corrosivos y abrasivos en los equipos utilizados para su quema o molienda (Nogués *et al*, 2010, pág. 136). Generalmente, para la biomasa estos valores son inferiores al 1%p aunque a veces pueden ser superiores. Para el caso en estudio, los mayores resultados para nitrógeno y cloro se obtuvieron en Pantanillos madera industria (Pmi) y de azufre en Arauco madera industria (Ami).

La presencia de oxígeno tiene aspectos positivos y negativos para el uso de la biomasa como combustible en métodos de conversión termoquímica puesto que su presencia contribuye a suplir las necesidades de aire para llevar a cabo el proceso de combustión completa de los residuos pero a su vez disminuye su aporte energético (Subero, 2010, pág. 15). Los resultados obtenidos, muestran que existen diferencias significativas en los contenidos de O de las maderas y cortezas de ambas localidades y sectores (anexo 3).

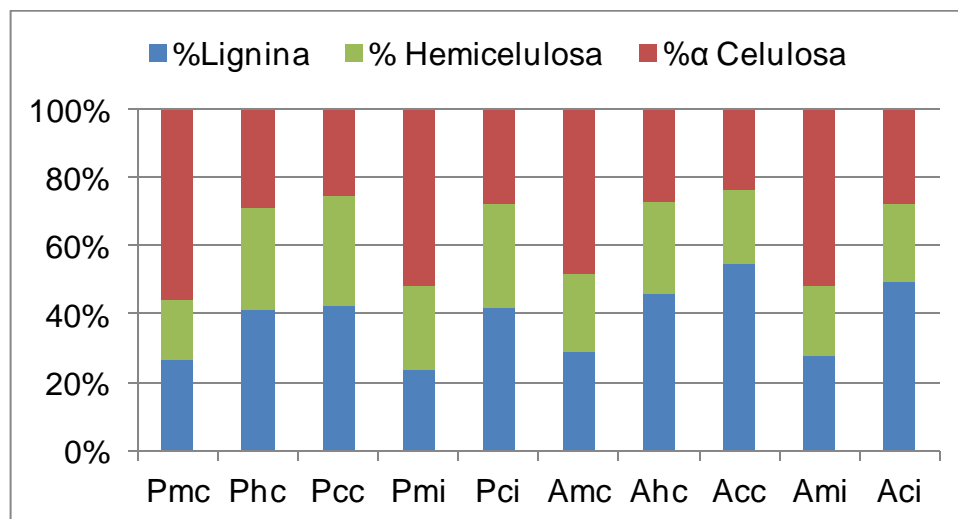
Si se hace un paralelo del análisis elemental del presente estudio con el de Newcastle se pueden encontrar ligeras variaciones entre los valores, pues las cantidades de C, H, O, N y S en %p para el pino cultivado en Australia son 49,3 6,42 42,5 0,04 y 0,09 respectivamente (Cetin *et al*, 2005).

Ciertamente, es importante resaltar que el análisis elemental de la biomasa residual no sólo tiene utilidad en métodos termoquímicos para la obtención de energía. Si se opta por un método bioquímico, el análisis elemental brinda información valiosa también. Por ejemplo, el C y N son elementos indispensables en la nutrición y síntesis de proteínas de los microorganismos. Su relación permitirá conocer la digestibilidad del material a usar.

Entonces, si la biomasa forestal tiene una adecuada cantidad de C/N se podría considera como apta para un tratamiento bioquímico. Son favorables relaciones aproximadas de 10/1 a 30/1. Llegado el caso en que sea menor de 8/1 es posible que se presente inhibición por exceso de amoniaco, por lo que en muchos casos se hace necesaria la mezcla de sustratos con el fin de alcanzar las condiciones adecuadas y así un mayor rendimiento (Werner *et al*, 1989, pág. 41).

En cuanto al análisis de los componentes, los resultados en estudio se muestran en el grafico 3. Se observa que los altos contenidos de lignina se presentan en las cortezas cuyo máximo valor fue de 55,53%p para Arauco corteza cosecha (Acc). En cambio la presencia de celulosa estuvo marcada en las maderas de ambas regiones con un valor máximo de 58,11%p correspondiente a Pantanillos madera cosecha (Pmc).

Grafica 3 Análisis componentes de madera y corteza



Estos resultados pueden indicar cuál será el aporte de uno u otro material en una posible transformación bioquímica para la obtención de combustibles. Si se opta por un proceso fermentativo, emplear las maderas de Arauco o Pantanillo podría ser adecuado, puesto que sus altos contenidos de celulosa y hemicelulosa

permitirían obtener buenos rendimientos en la producción de etanol a partir de los azúcares que componen dichas macromoléculas. Sin embargo, si se optara por la obtención de Biogás será necesario aportar N para mejorar la digestibilidad del material.

Si se opta por un proceso termoquímico, las cortezas de ambas regiones serían una buena opción. Los altos porcentajes principalmente de lignina junto a la celulosa y hemicelulosa, según Saddler, permitirán obtener cantidades importantes de biodiesel sintético a partir de procesos de conversión de biomasa a líquido (BTL), es decir, una operación de gasificación seguida de un proceso de Fisher-Tropsch (Saddler *et al*, 2010).

Por último, para contar con un combustible de buena calidad, seguro y además eficiente a partir de biomasa residual, se hace necesario conocer también cualitativa y cuantitativamente su composición en cuanto a inorgánicos (elementos mayores y menores), todo esto con el fin de prevenir posibles daños a la maquinaria empleada en el tratamiento del material, como corrosión, formación y depósito de escoria, causadas por el calcio, magnesio, silicio o potasio, y también emisiones de material particulado contaminante, principalmente de plomo o mercurio (Baerenthaler *et al*, 2006).

La tabla 6 y el anexo 4 muestran los resultados de los análisis de elementos inorgánicos mayores y menores para cada uno de los materiales en estudio.

Tabla 6: Componentes inorgánicos (elementos mayores)

Elementos Mayores [mg/Kg]								
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	P	Si
Pmc	278	559	229	385	3963	143	<122	392
Phc	1237	2027	1479	563	5138	357	<122	394
Pcc	349	5277	455	787	1512	478	<122	299
Pmi	265	377	232	465	2984	63	<122	441
Pci	1789	876	1584	736	6189	127	<122	929
Amc	1162	505	1584	375	3948	83	<122	866
Ahc	887	1305	1055	763	3209	198	<122	600
Acc	2741	875	2092	729	2516	112	<122	1007
Ami	569	393	746	393	3328	52	<122	512
Aci	694	891	796	768	1792	112	<122	689

La información obtenida para el Al, Fe, Mg y Si supera los valores típicos permitidos por la norma para maderas, siendo las de Arauco, en especial Arauco madera cosecha (Amc), las que mayor concentración de estos elementos contiene. También, el contenido Ca, K y Mn muestra resultados dentro de lo admitido en la norma, a excepción de las maderas de Pantanillos que superan los valores de K y Mn.

Para las cortezas, los valores de inorgánicos admisibles son diferentes. En el caso del Si y Mn se obtuvieron valores dentro de lo permitido, con concentraciones mayores del primero en Arauco y del segundo en Pantanillos. El contenido de K se mantuvo con poca variación en ambas localidades y sectores. En cambio pantanillos corteza industria (Pci) y Arauco corteza cosecha (Acc) superaron las concentraciones de Al aceptadas por la norma. La cantidad de Ca fue excesiva para la muestra Pantanillos corteza cosecha (Pcc) y en las demás se obtuvieron valores muy similares entre ellas. En el caso del Fe las muestras Arauco corteza industria (Aci), Arauco corteza cosecha (Acc) y Pantanillos corteza industria (Pci) superaron los valores típicos que se proponen en la norma. Los valores de Mg en las cortezas de ambas regiones superaron las estimaciones permisibles.

Las anteriores afirmaciones se hicieron teniendo en cuenta la información que la norma española (UNE-EN 14961-1, 2011) (anexo 5) presenta como valores típicos y permitidos de elementos mayores en biomasa forestal (madera y corteza) utilizada como biocombustible sólido, específicamente en coníferas. Los elementos menores de las muestras también pueden ser contrastados con la información que la norma expone para los mismos.

4. CONCLUSIONES

Los análisis próximo y elemental mostraron resultados propios para el pino radiata con variaciones significativas según el tipo de material (corteza y maderas), el sector de donde procede (industrial y forestal) y la localidad (Pantanillos y Arauco). Estas determinaciones serán de gran utilidad como apoyo a estudios posteriores en cuanto al diseño, selección y montaje de tecnología para el aprovechamiento energético de esta biomasa residual.

Si se opta por algún método termoquímico de conversión energética, la información de poder calorífico debe ser tomada en cuenta junto con otras propiedades que tienen influencia directa sobre ella como lo son el contenido de humedad, elementos orgánicos (C H O N), lignina, extraíbles y cenizas. Serían convenientes estudios de la composición y temperatura de fusibilidad de estas últimas, pues de esta forma se podría conocer su comportamiento (formación de escoria) en equipos típicos de combustión como calderas o quemadores. Aquí, las cortezas de ambas regiones en especial las de Arauco tuvieron mejores resultados, calóricamente hablando.

Si se optan por métodos bioquímicos, son buena elección cualquiera de las maderas estudiadas a pesar de que existen algunas diferencias en el contenido de celulosa y hemicelulosas. Se podrían realizar futuras determinaciones con el fin de conocer en qué proporciones están los azúcares que conforman estas macromoléculas y así dar conclusiones más acertadas sobre la factibilidad de un tratamiento biológico.

Las exigencias de la UNE-EN 14961-1 son cada vez mayores para el contenido de elementos inorgánicos en la biomasa pero su presencia es inherente al material, al tipo de suelo y las condiciones ambientales, por tal razón un mejor manejo de ese desecho marcaría la diferencia en cuanto a emisiones contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM D 1103-60 (77). (1960). *Method of Test for Alpha-Cellulose in Wood.*

ASTM D 1104-56 (78). (1956). *Method of Test for Holocellulose in Wood.*

ASTM D 1105-84. (1984). *Standar Method for Preparation of Extractive- Free Wood.*

ASTM D 1110-84. (1984). *Standar Test Method for Water Solubility of Wood.*

ASTM D1106-96 (2007). (1996). *Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood.*

ASTM E871-82 (2006). (1982). *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels.*

ASTM: D 3172-07a. (2007). *Standar Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke.*

ASTM: D 3174-11. (2011). *Standar Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.*

ASTM: D 3175-11. (2011). *Standar Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke.*

Baerenthaler, B., Zischka, M., Haraldsson, C., & Obernberger, I. (2006). Determination of major and minor ash-forming elements in solid biofuels. *Biomass and Bioenergy*, 983-997.

Bertran, J., & Morales, E. (2008, Enero). Potencial de Generación de Energía por Residuos del Manejo Forestal en Chile. Santiago, Chile: Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile (CNE/GTZ).

CEN/TS 15103. (2005). *Solid biofuels. Methods for the determination of bulk density.*

CEPAL. (2005). Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Estudio de Caso Chile . *Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: Estudio de Caso Chile* . Santiago, Chile: Publicación de las Naciones Unidas.

CER. (2010). *Acerca de nosotros: Centro de Energías Renovables de Chile*. Retrieved Octubre 11, 2011, from Sitio web del Centro de Energías Renovables de Chile: http://www.cer.gob.cl/?page_id=31

Cetin, E. (2005). Effect of pyrolysis pressure and heating rate on radiata pine char structure and apparent gasification reactivity. *Fuel* , 1328–1334.

CNE . (2011). *Acerca de nosotros: CNE*. Retrieved Noviembre 07, 2011, from Sitio web de la Comisión Nacional de Energía de Chile: http://www.cne.cl/cnewww/opencms/03_Energias/Hidrocarburos/Tipos_Energeticos.html

CONAMA. (2010). *Comision Nacional de Medio Ambiente*. Retrieved Octubre 03, 2011, from CONAMA: http://www.conama.cl/educacionambiental/1142/articles-29099_recurso_8.pdf

CORMA. (2010). *Acerca de nosotros: Corporación Chilena de la Madera*. Retrieved Septiembre 20, 2011, from Sitio web de CORMA: <http://www.corma.cl/corma.asp?id=3&ids=130>

EREC & Greenpeace International. (2008). *Energy Revolution: A Sustainable Global Energy Outlook*. A nivel mundial.

Fengel, D., & Wegener, G. (1983). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. New York: Walter de Gruyter.

Fitzpatrick, M. (2011, Mayo). Characterization and Processing of Lignocellulosic Biomass in Ionic Liquids. Kingston, Ontario, Canadá: Queen's University.

Gedde, D. (2010). *Alternative Energy Solutions Projects: A Business Case for Forest Waste Feedstock Energy Production*. Mount Gambier, Sur de Australia: Geddes Management Pty Ltd.

IDAE. (2007, Octubre). *Manuales de Energías Renovables: Energía de la Biomasa*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía.

INFOR. (2008). *Estimación de la Superficie de Bosques Plantados por Especie Según Región*. Santiago de Chile: Centro de Información Forestal .

IPCC. (2008). *Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis*. Ginebra, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático.

Jain, M. (2010). *Los Problemas Energéticos de Chile y Sus Soluciones: El Rol de las Energías Renovables No Convencionales*. Retrieved Septiembre 16, 2011, from http://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/944

Jara, W. (2006). *Introducción a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC)*. Santiago, Región Metropolitana, Chile: Empresa Nacional de Electricidad S.A Endesa Chile.

Lehnen, R. (2009, Junio 29). Utilization of lignin as polymeric material. Hamburgo, Alemania.

Lopez, F., García, J., Fera, M., Zamudio, M., & Perez, A. (2010). Biorrefinería de Materiales Lignocelulósicos: Eucaliptus globulus. *Boletín del CIDEU* , 75-82.

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1):overview of biomass. *Bioresourse Technology* , 37-46.

Melendez, J., Rodríguez, A., & Urrutia, G. (2006, Mayo). Implementación de la Tecnología de la Gasificación para Operar en los Beneficios del Café. *Implementación de la Tecnología de la Gasificación para Operar en los Beneficios del Café* . San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana "José Simeon Cañas".

Ministerio de Energía Gobierno de Chile. (2008). *Acerca de nosotros: Energía para Chile*. Retrieved Septiembre 16, 2011, from Sitio web de Energia para Chile: <http://www.energiaparachile.cl/>

Napadensky, A. (2010). Paisajes Rurales y Producción Energética. Luces y Sombras de una Transformación en Proceso. *XXI Simposio de Cooperativismo y Desarrollo Rural* (pp. 1-8). Osorno: Departamento de Arquitectura y Diseño. Universidad de los Lagos.

Navarrete, E., & Espinoza, M. (2011). Using the Non-Parametric Classifier CART to Model Wood Density. *Journal of Data Science* , 261-270.

Nogués, F., Garcia, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.

NREL. (2011, ABRIL 08). *Acerca de nosotros: National Renewable Energy Laboratory*. Retrieved Enero 05, 2012, from Sitio web de NREL: http://www.nrel.gov/biomass/analytical_procedures.html#

Parikh, J., Channiwala, S., & Ghosal, G. (2007). A Correlation for Calculating Elemental Composition from Proximal Analysis of Biomass Material. *ELSevier Fuel First* , 1710-1719.

Pontt, C. (2008). *Estudio de contribución de las ERNC al SIC al 2025: Potencial de Biomasa en Chile*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

Programa Chile Sustentable. (2004). *Crisis Energética en Chile: Rol y Futuro de las Energías Renovables No Convencionales*. Santiago de Chile: LOM Ediciones.

RPBC. (2003). *Radiata Pine Wood Density*. Rotorua: RPBC.

Saddler, J., Sims, R., Mabee, W., & Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology* , 1570–1580.

Senovilla, L., & Antolín, G. (2005). Revalorización Energética de los residuos de la Industria Vitivinícola. 2. Valladolid, Valladolid, España.

Speight, J. (2005). *Handbook of coal analysis*. New Jersey: Wiley Interscience .

Stroeve, P., Kumar, P., Barrett, D., & Delwiche, M. (2009). Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Industrial and Engineering Chemistry Research* , 3713-3729.

Subero, E. (2010). *Caracterización de los combustibles Sólidos*. Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial.

Telmo, C., & Lousada, J. (2009). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy* , 1663-1667.

UNDP. (2011). *Human Development Report 2011 Sustainability and Equity: A Better Future for All*. New York: Published for the United Nations Development Programme (UNDP).

UNE-CEN/TS 14778-1:. (2007). *Solid biofuels - Sampling - Part 1: Methods for sampling*.

UNE-CEN/TS 14778-2. (2007). *Solid biofuels - Sampling - Part 2: Methods for sampling particulate material transported in lorries*.

UNE-EN 14918:2009. (2009). *Solid biofuels - Determination of calorific value*.

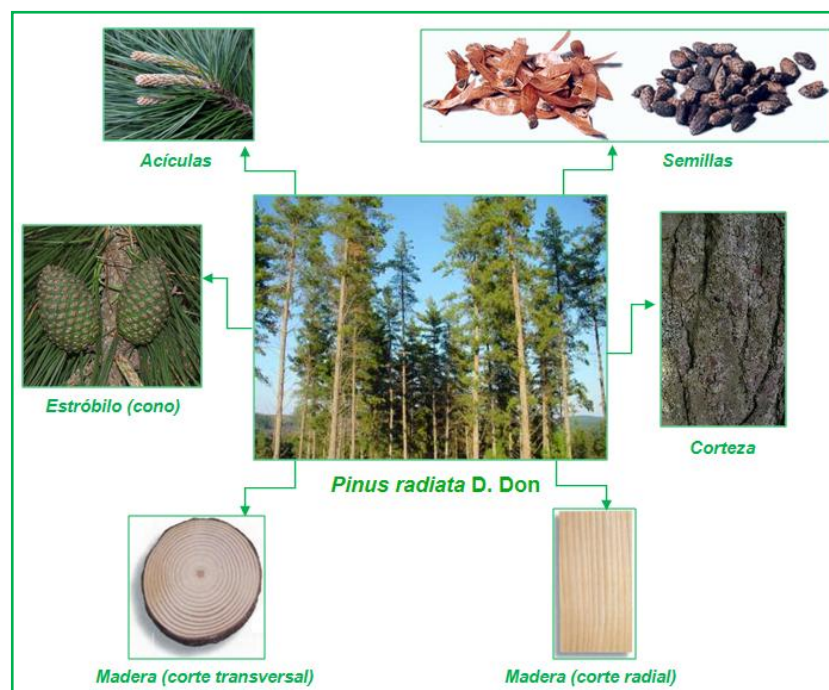
UNE-EN 14961-1. (2011). *Biocombustibles Sólidos : Especificaciones y clases de combustibles Parte 1: Requisitos Generales*.

Werner, U., Stöhr, U., & Hees, N. (1989). *Biogas plants in animal husbandry*. Germany: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.

Wittelsbürger, H. (2007, Diciembre). La política energética de Chile: de la dependencia al desarrollo sostenible. *Díálogo Político* , 35-52.

ANEXO 1

FICHA TÉCNICA DEL *PINUS RADIATA* D. DON



Denominaciones						
Pino radiata, Pino insigne, Pino de Monterrey, Pino de California						
Clasificación						
Reino	División	Clase	Orden	Familia	Genero	Especie
Plantae	Pinophyta	Pinopsida	Pinales	Pinaceae	Pinus	<i>Pinus radiata</i>
Distribución Geográfica						
Originaria del sur de California EE.UU (Monterrey), fue introducido con éxito en Europa, Chile, Nueva Zelanda, Australia, Brasil y Sudáfrica						
Características						
Altura [m]	Diámetro [m]	Crecimiento	Requerimientos de Agua		Requerimientos de Sol	
30 - 50	0,4 - 1	Rápido	Medio		Alto	

ANEXO 2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PODER CALORÍFICO

Normality Test: Passed (P=0,952)

Equal Variance Test: Passed (P=0,150)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Phc	3	0	20,634	0,0725	0,0419
Pcc	3	0	20,818	0,0167	0,00966
Pci	3	0	20,990	0,0852	0,0492
Pmc	3	0	20,236	0,142	0,0821
Pmi	3	0	19,688	0,0634	0,0366
Ahc	3	0	20,716	0,0595	0,0343
Acc	3	0	21,460	0,00235	0,00135
Aci	3	0	21,015	0,122	0,0707
Amc	3	0	20,447	0,0513	0,0296
Ami	3	0	20,554	0,0674	0,0389

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	9	6,257	0,695	110,793	<0,001
Residual	20	0,125	0,00627		
Total	29	6,382			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor:					
Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
Acc vs. Pmi	1,772	27,399	<0,001	0,001	Yes
Aci vs. Pmi	1,327	20,516	<0,001	0,001	Yes
Pci vs. Pmi	1,302	20,129	<0,001	0,001	Yes
Acc vs. Pmc	1,225	18,939	<0,001	0,001	Yes
Pcc vs. Pmi	1,130	17,467	<0,001	0,001	Yes
Ahc vs. Pmi	1,027	15,885	<0,001	0,001	Yes
Acc vs. Amc	1,014	15,674	<0,001	0,001	Yes
Phc vs. Pmi	0,946	14,624	<0,001	0,001	Yes
Acc vs. Ami	0,907	14,017	<0,001	0,001	Yes
Ami vs. Pmi	0,866	13,382	<0,001	0,001	Yes
Acc vs. Phc	0,826	12,775	<0,001	0,001	Yes
Aci vs. Pmc	0,780	12,056	<0,001	0,002	Yes
Amc vs. Pmi	0,758	11,725	<0,001	0,002	Yes
Pci vs. Pmc	0,755	11,668	<0,001	0,002	Yes
Acc vs. Ahc	0,745	11,515	<0,001	0,002	Yes
Acc vs. Pcc	0,642	9,932	<0,001	0,002	Yes
Pcc vs. Pmc	0,583	9,007	<0,001	0,002	Yes
Aci vs. Amc	0,569	8,791	<0,001	0,002	Yes
Pmc vs. Pmi	0,547	8,460	<0,001	0,002	Yes
Pci vs. Amc	0,543	8,403	<0,001	0,002	Yes
Ahc vs. Pmc	0,480	7,424	<0,001	0,002	Yes
Acc vs. Pci	0,470	7,271	<0,001	0,002	Yes
Aci vs. Ami	0,461	7,134	<0,001	0,002	Yes
Acc vs. Aci	0,445	6,883	<0,001	0,002	Yes
Pci vs. Ami	0,436	6,747	<0,001	0,002	Yes
Phc vs. Pmc	0,399	6,164	<0,001	0,003	Yes
Aci vs. Phc	0,381	5,892	<0,001	0,003	Yes
Pcc vs. Amc	0,371	5,742	<0,001	0,003	Yes
Pci vs. Phc	0,356	5,504	<0,001	0,003	Yes
Ami vs. Pmc	0,318	4,922	<0,001	0,003	Yes
Aci vs. Ahc	0,300	4,632	<0,001	0,003	Yes
Pci vs. Ahc	0,274	4,244	<0,001	0,004	Yes
Ahc vs. Amc	0,269	4,159	<0,001	0,004	Yes
Pcc vs. Ami	0,264	4,085	<0,001	0,004	Yes
Amc vs. Pmc	0,211	3,265	0,004	0,005	Yes
Aci vs. Pcc	0,197	3,049	0,006	0,005	No
Phc vs. Amc	0,187	2,899	0,009	0,006	No
Pcc vs. Phc	0,184	2,843	0,010	0,006	No
Pci vs. Pcc	0,172	2,661	0,015	0,007	No
Ahc vs. Ami	0,162	2,503	0,021	0,009	No
Ami vs. Amc	0,107	1,656	0,113	0,010	No
Pcc vs. Ahc	0,102	1,583	0,129	0,013	No
Ahc vs. Phc	0,0815	1,260	0,222	0,017	No
Phc vs. Ami	0,0805	1,242	0,229	0,025	No
Aci vs. Pci	0,0251	0,388	0,702	0,050	No

ANEXO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL CARBONO

Normality Test: Passed (P=0,605)

Equal Variance Test: Passed (P=0,556)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
PCC	3	0	48,730	0,0483	0,0279
PCI	3	0	50,223	0,0521	0,0301
ACC	3	0	49,507	0,132	0,0764
ACI	3	0	49,647	0,0324	0,0187
PMC	3	0	47,651	0,0804	0,0464
PMI	3	0	48,107	0,0788	0,0455
AMI	3	0	48,299	0,0475	0,0274
AMC	3	0	48,173	0,109	0,0627

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	7	17,076	2,439	387,621	<0,001
Residual	16	0,101	0,00629		
Total	23	17,177			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
PCI vs. PMC	2,572	39,705	<0,001	0,002	Yes
PCI vs. PMI	2,116	32,668	<0,001	0,002	Yes
PCI vs. AMC	2,050	31,651	<0,001	0,002	Yes
ACI vs. PMC	1,996	30,815	<0,001	0,002	Yes
PCI vs. AMI	1,924	29,703	<0,001	0,002	Yes
ACC vs. PMC	1,856	28,659	<0,001	0,002	Yes
ACI vs. PMI	1,540	23,779	<0,001	0,002	Yes
PCI vs. PCC	1,493	23,051	<0,001	0,002	Yes
ACI vs. AMC	1,474	22,761	<0,001	0,003	Yes
ACC vs. PMI	1,401	21,623	<0,001	0,003	Yes
ACI vs. AMI	1,348	20,814	<0,001	0,003	Yes
ACC vs. AMC	1,335	20,605	<0,001	0,003	Yes
ACC vs. AMI	1,209	18,658	<0,001	0,003	Yes
PCC vs. PMC	1,079	16,654	<0,001	0,003	Yes
ACI vs. PCC	0,917	14,161	<0,001	0,004	Yes
ACC vs. PCC	0,778	12,005	<0,001	0,004	Yes
PCI vs. ACC	0,715	11,045	<0,001	0,004	Yes
AMI vs. PMC	0,648	10,002	<0,001	0,005	Yes
PCC vs. PMI	0,623	9,617	<0,001	0,005	Yes
PCI vs. ACI	0,576	8,890	<0,001	0,006	Yes
PCC vs. AMC	0,557	8,600	<0,001	0,006	Yes
AMC vs. PMC	0,522	8,054	<0,001	0,007	Yes
PMI vs. PMC	0,456	7,037	<0,001	0,009	Yes
PCC vs. AMI	0,431	6,652	<0,001	0,010	Yes
AMI vs. PMI	0,192	2,965	0,009	0,013	Yes
ACI vs. ACC	0,140	2,156	0,047	0,017	No
AMI vs. AMC	0,126	1,947	0,069	0,025	No
AMC vs. PMI	0,0659	1,018	0,324	0,050	No

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL HIDRÓGENO

Normality Test: Passed (P=0,740)

Equal Variance Test: Passed (P=0,692)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
PCC	3	0	5,710	0,000511	0,000295
PCI	3	0	5,703	0,00775	0,00448
ACC	3	0	5,559	0,00883	0,00510
ACI	3	0	5,623	0,0105	0,00604
PMC	3	0	5,882	0,00475	0,00274
PMI	3	0	6,013	0,00545	0,00315
AMI	3	0	5,988	0,00798	0,00461
AMC	3	0	6,009	0,00368	0,00212

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	7	0,710	0,101	2150,453	<0,001
Residual	16	0,000755	0,0000472		
Total	23	0,711			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):

Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
PMI vs. ACC	0,454	80,912	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. ACC	0,449	80,141	<0,001	0,002	Yes
AMI vs. ACC	0,429	76,427	<0,001	0,002	Yes
PMI vs. ACI	0,390	69,495	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. ACI	0,385	68,723	<0,001	0,002	Yes
AMI vs. ACI	0,365	65,010	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. ACC	0,322	57,477	<0,001	0,002	Yes
PMI vs. PCI	0,310	55,277	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. PCI	0,306	54,506	<0,001	0,003	Yes
PMI vs. PCC	0,303	54,108	<0,001	0,003	Yes
AMC vs. PCC	0,299	53,336	<0,001	0,003	Yes
AMI vs. PCI	0,285	50,792	<0,001	0,003	Yes
AMI vs. PCC	0,278	49,622	<0,001	0,003	Yes
PMC vs. ACI	0,258	46,060	<0,001	0,003	Yes
PMC vs. PCI	0,179	31,842	<0,001	0,004	Yes
PMC vs. PCC	0,172	30,673	<0,001	0,004	Yes
PCC vs. ACC	0,150	26,805	<0,001	0,004	Yes
PCI vs. ACC	0,144	25,635	<0,001	0,005	Yes
PMI vs. PMC	0,131	23,435	<0,001	0,005	Yes
AMC vs. PMC	0,127	22,663	<0,001	0,006	Yes
AMI vs. PMC	0,106	18,950	<0,001	0,006	Yes
PCC vs. ACI	0,0863	15,387	<0,001	0,007	Yes
PCI vs. ACI	0,0797	14,218	<0,001	0,009	Yes
ACI vs. ACC	0,0640	11,417	<0,001	0,010	Yes
PMI vs. AMI	0,0252	4,485	<0,001	0,013	Yes
AMC vs. AMI	0,0208	3,714	0,002	0,017	Yes
PCC vs. PCI	0,00656	1,169	0,259	0,025	No
PMI vs. AMC	0,00433	0,771	0,452	0,050	No

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL OXÍGENO

Normality Test: Passed (P=0,587)

Equal Variance Test: Passed (P=0,381)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
PMC	3	0	43,484	0,0198	0,0114
PCC	3	0	41,290	0,0127	0,00733
PCI	3	0	40,665	0,0684	0,0395
ACC	3	0	39,434	0,0427	0,0246
ACI	3	0	40,049	0,0984	0,0568
PMC	3	0	43,484	0,0198	0,0114
PMI	3	0	44,682	0,0862	0,0498
AMI	3	0	44,349	0,101	0,0581
AMC	3	0	44,613	0,0784	0,0453

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	8	104,380	13,048	2877,077	<0,001
Residual	18	0,0816	0,00453		
Total	26	104,462			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0,001).

Power of performed test with alpha = 0,050: 1,000

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Holm-Sidak method):
Overall significance level = 0,05

Comparisons for factor:					
Comparison	Diff of Means	t	Unadjusted P	Critical Level	Significant?
PMI vs. ACC	5,248	95,444	<0,001	0,001	Yes
AMC vs. ACC	5,178	94,178	<0,001	0,001	Yes
AMI vs. ACC	4,914	89,378	<0,001	0,002	Yes
PMI vs. ACI	4,633	84,263	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. ACI	4,564	82,997	<0,001	0,002	Yes
AMI vs. ACI	4,300	78,197	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. ACC	4,049	73,642	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. ACC	4,049	73,642	<0,001	0,002	Yes
PMI vs. PCI	4,018	73,066	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. PCI	3,948	71,799	<0,001	0,002	Yes
AMI vs. PCI	3,684	66,999	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. ACI	3,434	62,461	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. ACI	3,434	62,461	<0,001	0,002	Yes
PMI vs. PCC	3,392	61,698	<0,001	0,002	Yes
AMC vs. PCC	3,323	60,432	<0,001	0,002	Yes
AMI vs. PCC	3,059	55,632	<0,001	0,002	Yes
PMC vs. PCI	2,819	51,264	<0,001	0,003	Yes
PMC vs. PCI	2,819	51,264	<0,001	0,003	Yes
PMC vs. PCC	2,194	39,896	<0,001	0,003	Yes
PMC vs. PCC	2,194	39,896	<0,001	0,003	Yes
PCC vs. ACC	1,855	33,746	<0,001	0,003	Yes
PCC vs. ACI	1,241	22,565	<0,001	0,003	Yes
PCI vs. ACC	1,230	22,378	<0,001	0,004	Yes
PMI vs. PMC	1,199	21,802	<0,001	0,004	Yes
PMI vs. PMC	1,199	21,802	<0,001	0,004	Yes
AMC vs. PMC	1,129	20,536	<0,001	0,005	Yes
AMC vs. PMC	1,129	20,536	<0,001	0,005	Yes
AMI vs. PMC	0,865	15,736	<0,001	0,006	Yes
AMI vs. PMC	0,865	15,736	<0,001	0,006	Yes
PCC vs. PCI	0,625	11,367	<0,001	0,007	Yes
PCI vs. ACI	0,616	11,197	<0,001	0,009	Yes
ACI vs. ACC	0,615	11,181	<0,001	0,010	Yes
PMI vs. AMI	0,334	6,067	<0,001	0,013	Yes
AMC vs. AMI	0,264	4,800	<0,001	0,017	Yes
PMI vs. AMC	0,0696	1,266	0,222	0,025	No
PMC vs. PMC	0,000	0,000	1,000	0,050	No

ANEXO 4

ANÁLISIS DE INORGÁNICOS (ELEMENTOS MENORES)

Elementos Menores [mg/Kg]												
	Ag	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg		
Pmc	0,11	<2,30	4,81	9,17	<0,018	0,12	0,17	2,52	7,04	0,009		
Phc	0,35	<2,30	23,46	14,65	<0,018	0,50	1,14	5,97	6,47	0,022		
Pcc	0,53	<2,30	18,67	8,51	<0,018	<0,06	0,64	1,37	4,69	0,028		
Pmi	0,10	<2,30	26,75	4,21	<0,018	0,29	<0,11	3,21	3,96	0,006		
Pci	<0,047	<2,30	16,96	9,01	<0,018	0,12	1,11	3,77	4,24	0,014		
Amc	<0,047	<2,30	35,29	11,73	<0,018	0,08	0,96	6,07	6,13	0,006		
Ahc	<0,047	<2,30	10,02	15,77	<0,018	0,12	0,68	3,61	4,46	0,011		
Acc	<0,047	<2,30	18,66	24,30	<0,018	0,16	1,27	6,50	6,56	0,018		
Ami	<0,047	<2,30	8,95	4,69	<0,018	0,27	0,39	3,65	5,21	0,009		
Aci	<0,047	<2,30	8,34	17,02	<0,018	0,07	0,55	20,38	4,06	0,015		

Elementos Menores [mg/Kg]												
	Mo	Ni	Pb	Rb	Rh	Se	Sr	Ti	V	Y	Zn	Zr
Pmc	0,43	1,74	0,98	<5,00	132,00	<1,80	<5,00	<31,00	0,81	<5,00	<0,13	<6,00
Phc	0,49	4,50	1,01	<5,00	183,50	<1,80	<5,00	<31,00	5,03	<5,00	25,26	<6,00
Pcc	<0,31	1,87	0,70	<5,00	193,00	<1,80	49,70	18,33	2,03	<5,00	<0,13	30,75
Pmi	<0,31	4,39	0,94	<5,00	90,70	<1,80	<5,00	<31,00	0,39	<5,00	<0,13	<6,00
Pci	<0,31	3,14	<0,27	21,45	162,33	<1,80	26,75	78,77	4,93	<5,00	25,30	20,70
Amc	<0,31	3,71	<0,27	<5,00	167,67	<1,80	<5,00	10,48	5,21	<5,00	19,82	<6,00
Ahc	0,68	3,02	<0,27	<5,00	159,50	<1,80	36,45	9,88	3,00	18,90	20,15	24,85
Acc	<0,31	4,63	<0,27	21,75	157,67	<1,80	<5,00	78,77	7,01	<5,00	30,17	<6,00
Ami	<0,31	2,56	0,60	<5,00	134,50	<1,80	<5,00	<31,00	2,27	<5,00	9,69	<6,00
Aci	0,55	8,28	<0,27	25,85	170,50	<1,80	41,75	26,50	2,20	18,60	18,83	23,30

ANEXO 5

VALORES TÍPICOS DE ELEMENTOS EN MADERA DE CONÍFERAS

Parámetro	Unidad	Madera de coníferas	
		Valor Típico	Variación Típica
Cenizas	%p	0,3	0,1 a 1
PCS	MJ/kg	20,5	20 a 20,8
PCI	MJ/kg	19,1	18,5 a 19,8
C	%p	51	47 a 54
H	%p	6,3	5,6 a 7
O	%p	42	40 a 44
N	%p	0,1	<0,1 a 0,5
S	%p	<0,02	<0,01 a 0,02
Cl	%p	0,01	<0,01 a 0,03
F	%p	<0,0005	<0,0005
Al	mg/kg	100	30 a 400
Ca	mg/kg	900	500 a 1000
Fe	mg/kg	25	10 a 100
K	mg/kg	400	200 a 500
Mg	mg/kg	150	100 a 200
Mn	mg/kg	100	40 a 200
P	mg/kg	60	50 a 100
Si	mg/kg	150	100 a 200
Ti	mg/kg	<20	<20
As	mg/kg	<0,1	<0,1 a 1
Cd	mg/kg	0,1	<0,05 a 0,5
Cr	mg/kg	1	0,2 a 10
Cu	mg/kg	2	0,5 a 10
Hg	mg/kg	0,02	<0,02 a 0,05
Ni	mg/kg	0,5	<0,1 a 10
Pb	mg/kg	2	<0,5 a 10
V	mg/kg	<2	<2
Zn	mg/kg	10	5 a 50

VALORES TÍPICOS DE ELEMENTOS EN CORTEZA VIRGEN DE CONÍFERAS

Parámetro	Unidad	Corteza de madera de coníferas	
		Valor Típico	Variación Típica
Cenizas	%p	1,5	< 1 a 5
PCS	MJ/kg	20,4	18,0 a 21,4
PCI	MJ/kg	19,2	17,5 a 20,5
C	%p	52	48 a 55
H	%p	5,9	5,5 a 6,4
O	%p	38	0,3 a 0,9
N	%p	0,5	<0,02 a 0,05
S	%p	0,03	<0,01 a 0,05
Cl	%p	0,02	<0,0005 a 0,002
F	%p	0,001	400 a 1200
Al	mg/kg	800	1000 a 15000
Ca	mg/kg	5000	100 a 800
Fe	mg/kg	500	1000 a 3000
K	mg/kg	2000	400 a 1500
Mg	mg/kg	1000	9 a 840
Mn	mg/kg	500	70 a 2000
P	mg/kg	400	20 a 600
Si	mg/kg	2000	500 a 5000
As	mg/kg	1	0,1 a 4
Cd	mg/kg	0,5	0,2 a 1
Cr	mg/kg	5	1 a 10
Cu	mg/kg	5	3 a 30
Hg	mg/kg	0,05	0,01 a 0,1
Ni	mg/kg	10	2 a 20
Pb	mg/kg	4	1 a 30
V	mg/kg	1	0,7 a 2
Zn	mg/kg	100	70 a 200