

# Analisis comparativo de la torrefaccion humeda y seca de *Pinus radiata*

## Comparative Assessment of the Wet and Dry Torrefaction of *Pinus Radiata*

Luis Ernesto Arteaga-Perez<sup>a\*</sup>, Mauricio Flores<sup>a</sup>, Mauricio Escobar<sup>a</sup>, Cristina Segura<sup>a</sup> y Alfredo Gordon<sup>b</sup>

Recibido: Marzo 23 de 2015  
Recibido con revisión: Septiembre 14 de 2015  
Aceptado: Diciembre 01 de 2015

<sup>a\*</sup>Universidad de Concepción  
Unidad de Desarrollo Tecnológico  
Avenida Cordillera N°2634  
Parque Industrial Coronel  
Coronel - Chile  
Tel.: +(56) 422661855  
l.arteaga@udt.cl

<sup>b</sup>Universidad de Concepción  
Departamento de Ingeniería Química

Energética 46, diciembre(2015), pp. 5-12

ISSN 0120-9833 (impreso)  
ISSN 2357 - 612X (en línea)  
www.revistas.unal.edu.co/energetica  
© Derechos Patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia



### RESUMEN

Se comparan dos pretratamientos termoquímicos, torrefacción seca y torrefacción húmeda (o carbonización hidrotermal-CHT), cuyo objetivo es modificar las propiedades físicas y químicas de madera de *Pinus radiata* para su uso como sustituto parcial del carbón mineral en sistemas de combustión. Las variables ensayadas fueron la temperatura y el tiempo de residencia. La torrefacción seca se estudió en régimen leve (220 °C), medio (250 °C) y severo (280 °C) y exhibió mayor rendimiento energético (~90% máximo) que la carbonización hidrotermal (~79.7% máximo), la cual se evaluó en un rango similar de temperaturas (218-300 °C). El carboncillo (bio- carbón) producido por CHT tiene un poder calorífico superior (PCS=26.3 MJ/kg) similar al carbón mineral de rango medio (29.3 MJ/kg). Se demostró que no se obtienen mejoras considerables en el rendimiento ni en el PCS del bio-carbón cuando se realiza la CHT por encima de 255 °C y 1 hora. Los productos orgánicos volátiles obtenidos en cada tratamiento tienen una composición similar, con predominio de ácidos carboxílicos, furfurales y azúcares.

### PALABRAS CLAVE

Torrefacción seca; Torrefacción húmeda; *Pinus radiata*.

### ABSTRACT

This work compares two thermochemical pretreatments, dry torrefaction and wet torrefaction (or hydrothermal carbonization-HTC), which aims to modify the physical and chemical properties of the wood of *Pinus radiata* for use as a partial substitute for coal in combustion processes. Parameters assayed in this work were temperature and residence time in the reactor. Dry torrefaction was studied in mild regime (220°C), medium (250°C) and severe (280°C) and exhibited greater energy efficiency (maximum ~ 90%) than hydrothermal carbonization (maximum ~ 79.7%): the latter was assayed in a similar range of temperatures (218 – 300°C). Powder charcoal (bio-carbon) produced by HTC has a higher heating value (HHV of 26.3 MJ/kg) similar to the HHV of a medium-rank coal (29.3 MJ/kg). The assays show that considerable improvements in performance or in the bio-carbon HHV are not obtained when the HTC process is carried above 255°C and for more than 1 hour. Volatile organic products obtained in each treatment have a similar composition, with a predominance of carboxylic acids, furfurals and sugars.

### KEYWORDS

Dry-Torrefaction, Wet-Torrefaction, *Pinus radiata*.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de recursos energéticos fósiles, el cambio climático, los conflictos bélicos y la corta vida proyectada para las reservas probadas y probables de combustibles, han conllevado a la inestabilidad mundial. En los últimos 40 años, el consumo de energía global se ha incrementado a razón de 110 Mtep/año y en igual periodo de tiempo las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la combustión de carbón (+8.9%) y gas natural (+5.9%) se duplicaron. A pesar de los programas internacionales [IEA & UN], estrategias regionales [Aida-america] y nacionales, no se ha podido cambiar el creciente ritmo de consumo ni el gráfico de distribución.

El panorama energético de Chile es coherente con el comportamiento de los principales indicadores a nivel global. En la última década, la nación ha experimentado un sostenido crecimiento en la demanda de energía primaria, la cual alcanzó en 2013 los 1.42 millones de PJ [Energ, 2014]. Los principales portadores energéticos en Chile son importados, y la distribución en la matriz energética primaria es de: petróleo (30%), biomasa (29%), el carbón (22%), el gas natural (13%). Específicamente el consumo de carbón creció en un 88.9% los últimos cinco años. El 92.7% de este recurso se utiliza para la generación de electricidad en sistemas de combustión que, solamente en 2012, emitieron un promedio de 7.18 MMtCO<sub>2</sub> [CDIAC]. Esta fuerte dependencia del mercado internacional ha forzado la búsqueda de similares renovables que garanticen la estabilidad energética del país. A pesar de que la biomasa representa cerca del 29% de la energía primaria en el país, su uso se distribuye en calefacción doméstica (10%), generación térmica industrial (12%) y generación eléctrica (7%), de esta última aproximadamente el 50% es de autoconsumo. Su uso como sustituto del carbón mineral es aún incipiente y se encuentra en fase de I&D.

### *Biomasa con fines energéticos en Chile*

Chile tiene una superficie forestal de aproximadamente 13.2 Millones de hectáreas de bosque nativo y 2.9 de plantaciones forestales [INFOR, 2014], fundamentalmente *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, cuyos rendimientos oscilan entre 25 – 35 m<sup>3</sup>/ha/año. La actividad silvícola y el procesamiento de los recursos forestales generan alrededor de 5.5 millones de toneladas de residuos energéticamente aprovechables [González et al., 2007], de los cuales solamente el 5.6% se utiliza para producir energía de calidad (electricidad) [Martínez-Saperas, 2014]. Este inmenso potencial no ha escapado del interés de los investigadores, y actualmente hay varios proyectos en ejecución relacionados con el uso de biomasa en sistemas de combustión. Sin embargo, el alto contenido de humedad (20-35%), bajo índice de molturabilidad (facilidad de molienda), biodegradabilidad y el relativamente bajo contenido de energía por unidad de volumen, son barreras que

atentan contra su uso como sustituto del carbón en los sistemas convencionales de combustión. Una de las vías para eliminar estas limitaciones es pre-tratar la biomasa mediante procesos mecánicos como la peletización (tecnología madura) y termoquímicos: (i) torrefacción húmeda y (ii) torrefacción seca (TS) (ambas en desarrollo).

### *Torrefacción húmeda*

De acuerdo a [Erlach et al., 2012], la torrefacción húmeda o carbonización hidrotermal (CHT), es un proceso de carbonización artificial que ocurre entre 175 y 250 °C en un medio acuoso a presión de saturación (20-60 bar) o ligeramente superior. Los sistemas de CHT permiten procesar una amplia gama de biomasa: paja de cereales, residuos agrícolas, residuos sólidos municipales, biomasa forestal, etc. Durante el tratamiento, ocurren reacciones de hidrólisis, decarboxilación, aromatización, deshidratación y condensación que modifican las relaciones O/C y O/H del sólido, reduciendo considerablemente la cantidad de oxígeno. Como resultado, se obtiene un sólido hidrofóbico que retiene entre el 80-95% del poder calorífico del material original en aproximadamente 55-90% de su peso y una corriente gaseosa compuesta principalmente por CO<sub>2</sub>. En el medio de reacción (solución acuosa) queda disuelta alrededor del 10% de la masa inicial en forma de ácidos carboxílicos, compuestos fenólicos, monosacáridos y furfural.

### *Torrefacción seca*

La torrefacción seca es un pretratamiento termoquímico, mediante el cual la estructura original de la biomasa se destruye parcialmente a medida que ésta se calienta (<50°C/min) hasta 200– 300°C. Durante el proceso, las moléculas de hemicelulosa, celulosa y, en menor grado la lignina se degradan en diferentes etapas o regímenes térmicos. La remoción de la humedad, la depolimerización de la hemicelulosa y la descomposición de la lignina son los fenómenos físicos y químicos que controlan el proceso y hacen que las relaciones atómicas O/C y O/H del sólido se asemejen a las del carbón. Como resultado se obtiene un producto sólido hidrofóbico, bio- resistente, fácil de triturar y que retiene entre 70-90% del poder calorífico de la biomasa sin tratar, en menos del 80% de su peso. Además, se genera una corriente de compuestos volátiles orgánicos (ácidos carboxílicos, fenoles, metanol, etc.) y gases permanentes (CO<sub>2</sub>, CO e H<sub>2</sub>) [Nocquet et al., 2014; Prins et al., 2006b].

De acuerdo con lo expuesto, ambos procesos ofrecen una oportunidad para mejorar las propiedades de la biomasa y convertirla en un bio-carbón. Sin embargo, son escasos los reportes en cuanto a su comparación con vistas a definir su factibilidad y las condiciones en las cuales podrían competir. El objetivo del presente trabajo es comparar ambos tratamientos, sobre la base de resultados obtenidos a escala de laboratorio en el pretratamiento de aserrín de *Pinus radiata*.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Caracterización de la biomasa

Las muestras de *Pinus radiata* fueron colectadas en la Región del Biobío (Chile), fundamentalmente de plantaciones cuya edad osciló entre 20 – 30 años. La biomasa se caracterizó antes y después de cada tratamiento mediante análisis elemental e inmediato. Los análisis se realizaron siguiendo la norma ASTM E870 “Standard Test Methods for Analysis of Wood”, y un equipo Thermo Finningan Model Flash EA series 1112. El poder calorífico superior se determinó en un calorímetro Parr 6400 de acuerdo a la norma ASTM D5865-13. Los resultados de los análisis para cada caso, se muestran en la Tabla 1.

Análisis Inmediato*		Análisis Elemental*	
Humedad (%)	3.61-7.12	Carbono (%)	48.25-48.94
Volátiles (%)	76.41	Hidrógeno (%)	6.19-6.91
Carbono Fijo (%)	15.5-15.17	Nitrógeno (%)	0.12-0.29
Cenizas (%)	0.3 – 1.3	Oxígeno (%)	43.73-45.25
PCS (MJ/kg)	17.80-18.08	<b>Fórmula Química</b>	
Celulosa (%)	40	$C_4H_{6.2}O_{2.7}N_{0.01}$	
Hemicelulosa (%)	28.5		
Lignina (%)	27.7		

\*Cada valor es el resultado de al menos tres réplicas, todos los valores están dados en base seca

**Tabla 1.** Caracterización de la biomasa sin tratar. Pino radiata.

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.2 Set-up experimentales

A continuación se describen los set-up experimentales y se resumen las condiciones de operación utilizadas.

#### 2.2.1 Torrefacción húmeda

Los ensayos CHT se realizaron en un reactor Parr (2) modelo 4546C con 1200 mL de capacidad (Figura 1). El sistema de reacción está equipado con controles para temperatura (1,3) y tiene una toma para muestreo de productos gaseosos (5).

En todos los ensayos se utilizó una razón pinus radiata/agua de 1:8 aproximadamente [Hoekman et al., 2011]. En cada experiencia, cerca de 50 g de biomasa seca se mezclaron con 400 g de agua desionizada. El interior del reactor se purgó con un flujo de nitrógeno por 10 min para extraer el oxígeno antes de comenzar el calentamiento. El tiempo de calentamiento hasta alcanzar la temperatura deseada, fluctuó entre los 55 y 80 min y la temperatura de reacción entre 180 °C y 300 °C [Hoekman et al., 2011]. El tamaño de partícula utilizado fue inferior a 0.6 mm de diámetro aproximadamente. Al finalizar el tiempo de reacción, el reactor



**Figura 1.** Esquema de laboratorio. **Torrefacción húmeda.** 1-Panel de control, 2- Reactor, 3-Medidor de presión, 4-Baño refrigerante, 5-Toma de gases.

**Fuente:** Elaboración propia

y su contenido fueron enfriados velozmente mediante inmersión en un baño de agua fría. El producto sólido se filtró y se secó en estufa (105 °C, 24 h).

#### 2.2.2 Torrefacción seca

En la Figura 2 se presenta un esquema de la instalación experimental utilizada para los ensayos de torrefacción seca. El reactor (5) es tubular de 1.2 m de longitud y 0.083 m de diámetro y está construido de acero inoxidable 316 SS. Este equipo tiene disposición vertical y está equipado con una celda interior (113 mL) para depositar las muestras de biomasa. La temperatura se ajusta con un flujo constante de N<sub>2</sub> (30 mL/min) previamente calentado en un horno tubular (3) de 3.2 kW de potencia. El sistema cuenta con controles para las temperaturas (4,6) y para el flujo de gas inerte (2).



**Figura 2.** Instalación de laboratorio. **Torrefacción seca.** 1-Balón de N<sub>2</sub>, 2- Regulador de caudal, 3- Calentador, 4-Indicadores de Temperatura, 5-Reactor, 6- Controles

**Fuente:** Elaboración propia

Previo a cada corrida, el reactor se purgó con  $N_2$ , y posteriormente el flujo de gas se ajustó a las condiciones experimentales. Los ensayos se realizaron con 10 g de *Pinus radiata/corrida* previamente seco (105 °C, 24 h) cuyo tamaño de partículas fue inferior a 2 mm, de esta forma se minimizan las resistencias a la transferencia de masa y calor. La temperatura de torrefacción se varió entre 220-280 °C, el tiempo de reacción entre 15 y 30 min.

### 2.3 Análisis de gases permanentes y condensables.

El balance de masa en cada proceso se completó en referencia a los resultados obtenidos para la fase sólida (rendimiento) y el líquido colectado después de cada experiencia. La composición química de los gases permanentes en la CHT se analizó por cromatografía gaseosa utilizando un detector de conductividad térmica (GC-TCD) y un cromatógrafo (AEROGRAF model A-90-P) equipado con una columna 60/80 carboxen 1.000 de 4,6 metros de longitud. Los compuestos orgánicos (condensables) se determinaron por cromatografía líquida de precisión (HPLC), en un equipo Merck Hitachi HPLC con auto-sampler Hitachi L-2200, una bomba Hitachi L-2130 y un detector Hitachi L-2400 UV. Adicionalmente, para la torrefacción seca se realizó una prueba TGA-GC/MS en el mismo rango de temperaturas que los experimentos, con el objetivo de identificar los volátiles que se forman. El análisis se desarrolló en una termo-balanza (NETZSCH modelo STA 409 PC) acoplada online a un espectrómetro de masas (QMS 403C Aëolos, Netzsc) y un barrido de señales a 2 ( $H_2$ ), 15 ( $H_3C^-$ ), 18 ( $H_2O$ ), 27 (CO), 32 ( $CH_3OH$ ), 44 ( $CO_2$ ), 46 ( $CH_2O_2$ ), 60 ( $C_2H_4O_2$ ), 74 ( $C_3H_6O_2$ ), 94 ( $C_6H_6O$ ), 96 ( $C_5H_4O_2$ ) amo.

### 2.4 Criterios de evaluación.

La pérdida de masa es un indicador muy efectivo para determinar el grado de torrefacción alcanzado por el material. La reducción del peso durante el pretratamiento está directamente ligada a la degradación térmica de los componentes fundamentales de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), especialmente la hemicelulosa [Almeida et al., 2010; Chen & Kuo, 2011]. En este trabajo se determinan el rendimiento másico (Eq. 1) y energético (Eq. 2), el grado de carbonización (análisis elemental) y la distribución de productos en los procesos de torrefacción seca y CHT.

A continuación se definen los parámetros empleados:

#### Rendimiento Másico

$$R_M = 100 \times \frac{m'}{m_a} \quad (1)$$

tj = torrefactado seco  
a = alimentación seca  
j = 1(seca), 2(CHT)

#### Rendimiento Energético

$$R_E = 100 \times R_M \frac{PCS_t}{PCS_a} \quad (2)$$

tj = torrefactado seco  
a = alimentación seca,  
j = 1(seca), 2(CHT)

#### Distribución de productos

$$F_i = 100 \times \frac{m_i}{m_a} \quad (3)$$

i = gas, líquido, sólido.

Donde:

$R_M$ , rendimiento másico (%);  $m_i$  es la masa (g);  $R_E$ , rendimiento energético (%); PCS, es el poder calorífico superior (MJ/kg).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Torrefacción húmeda. Efecto de parámetros operacionales.

Para evaluar el efecto de la temperatura en el proceso de CHT se mantuvo un tiempo de residencia constante (1 hora). Por otra parte, para determinar el efecto del tiempo se utilizó una temperatura de 255 °C. Las condiciones experimentales de operación utilizadas en esta sección, fueron determinadas en ensayos preliminares concordante con lo reportado en trabajo de [Hoekman et al., 2011].

### 3.2 Efecto de la temperatura y el tiempo de reacción.

Las Figuras 3 y 4 representan el efecto de la temperatura y el tiempo de reacción sobre el rendimiento másico y energético en el proceso de CHT. Para este proceso se observó una estabilización del rendimiento másico por encima de 255 °C, mientras que el bio-carbón incrementa de manera continua su poder calorífico, superando los 23.6 MJ/kg a 236 °C. El rendimiento energético se mantiene estable (74.2 a 79.2 %) en todo el rango, debido al efecto compensatorio entre la pérdida de peso y el aumento del poder calorífico (Eq. 2). Al sobrepasar los 255°C, existe una leve variación en ambos rendimientos mientras que el incremento en el poder calorífico es relativamente moderado (1.4 MJ/kg).

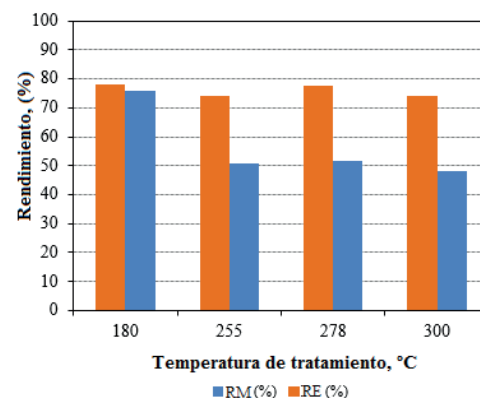
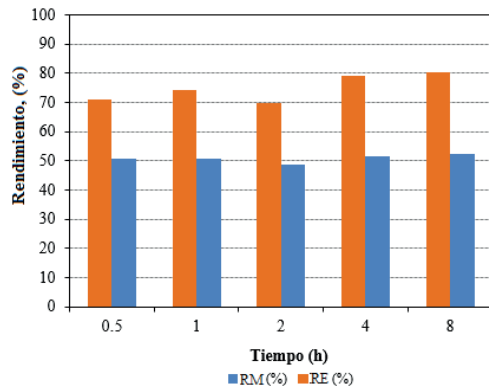


Figura 3. Efecto de la temperatura sobre RM y RE. Torrefacción húmeda.

Fuente: Elaboración propia

En relación al tiempo de procesamiento, el efecto es muy acotado, observándose un incremento continuo de ambos rendimientos a tiempos mayores de 2 horas. Este comportamiento se ha reportado previamente en la literatura [Lu et al., 2013] y se explica mediante un fenómeno de polimerización y condensación de compuestos solubilizados en fase acuosa (fundamentalmente azúcares y anhídros azúcares). Los orgánicos condensables y los gases permanentes formados durante el proceso, se distribuyeron igualmente (15% peso) y se detectaron ácidos carboxílicos, azúcares y  $\text{CO}_2$  como componentes fundamentales.



**Figura 4.** Efecto del tiempo sobre RM y RE. CHT a 255 °C.

**Fuente:** Elaboración propia

En un estudio similar [Yan et al., 2010] determinaron una producción de 2-9% p/p de ácidos orgánicos entre los cuales predominaron el ácido acético ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ) y fórmico ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ). Además, reportaron la formación de monosacáridos en forma de precipitados en el medio de reacción (xilosa, manosa, galactosa, etc). La formación de ácido acético está relacionada con el tipo de hemicelulosa presente en la materia prima, para el caso del *Pinus radiata* son el galacto- glucomanano y arábino- glucuronoxilano. A partir de la hidrólisis de celulosa y descomposición de glucosa se pueden generar ácidos acético, láctico, propiónico, levulínico y fórmico [Sevilla & Fuertes, 2009].

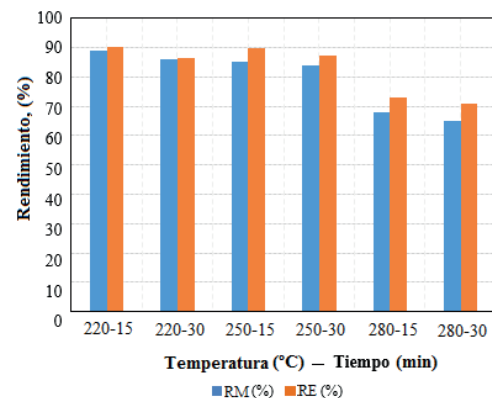
### 3.3 Torrefacción seca. Efecto de parámetros operacionales

El rango de temperaturas estudiado incluye los tres niveles de torrefacción reportados en la literatura: leve (200-235 °C), media (235-275 °C) y severa (275-300 °C). El tiempo de reacción fue inferior a 1 hora debido a que, por estudios de TGA reportados con anterioridad, se demostró que para valores superiores el proceso suele transcurrir muy lentamente [Chen et al. 2015].

#### 3.3.1 Efecto de la temperatura y tiempo de residencia

La temperatura es el principal parámetro de diseño en la torrefacción seca, pues define la degradación térmica alcanzada. Dicha degradación, puede explicarse a través de la descomposición individual de los polímeros en la estructura celular sin que exista interferencia de efectos sinérgicos [Chen & Kuo, 2011].

En la medida que se incrementa la temperatura, el rendimiento másico (89-65%) y energético (90- 71%) decrecen (Figura 5), básicamente producto de la deshidratación de la biomasa y la descomposición de la hemicelulosa y celulosa [Basu, 2013]. La hemicelulosa es un polímero lineal ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4\text{m}$ ) que por debajo de 220 °C se degrada muy poco, de aquí que el rendimiento másico obtenido para condiciones leves de torrefacción (220 °C) sea el mayor de todas las experiencias (89%). Cuando la temperatura supera los 250 °C, comienzan a liberarse  $\text{CO}_2$ , ácidos, fenoles, furfural, metanol entre otros compuestos orgánicos, principalmente por la depolimerización de la hemicelulosa (hasta un 95% p/p a 280 °C). Además los grupos carbonilos y carboxilos de la celulosa (>44% p/p) y los anillos aromáticos en la lignina también interactúan en el proceso [Nhuchhen et al., 2014; Basu et al., 2014]. La mayor resistencia de la celulosa a la degradación térmica está dada por su grado de cristalinidad, mientras que la lignina al ser un polímero fenólico tridimensional ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3(\text{OCH}_3)_{0.9-1.7}$ ), se descompone en un amplio rango de temperaturas 160 °C-900 °C. La similitud entre el rendimiento másico a 220 °C y 30 min (86%) y a 250 °C a 15 y 30 min (85, 84%) respectivamente, puede explicarse por el efecto de la temperatura sobre la cinética de la devolatilización de la hemicelulosa, el cual se supone como paso controlante en un proceso de dos etapas consecutivas (descomposición del sólido y devolatilización) [Van Der Stelt et al., 2011; Bates & Ghoniem, 2012; Sarvaramini et al., 2013]. Resultados similares pueden consultarse en [Basu, 2013]. A pesar de ser similares los rendimientos en masa a 220 °C y 250°C, el poder calorífico a 250 °C es superior, fundamentalmente porque los orgánicos liberados en este rango contienen mayor cantidad de O que H.



**Figura 5.** Efecto de la temperatura y el tiempo sobre RM y RE. Torrefacción Seca.

**Fuente:** Elaboración propia

El tiempo de residencia, aunque en menor medida, también afecta la descomposición térmica de la biomasa. La densidad energética del sólido aumenta con el tiempo, sin embargo la extensión del tratamiento trae

como consecuencia mayores requerimientos energéticos, de aquí que deba establecerse un compromiso entre el grado de torrefacción deseado, la temperatura y el tiempo de operación. En todo caso, operar por encima de 1 hora no trae beneficios considerables sobre las propiedades del sólido producido [Chen et al., 2015]. En el caso de la torrefacción seca, la composición de los volátiles se corresponde con los reportes de [Prins et al., 2006b; Bates & Ghoniem, 2012] y aunque en proporción diferente (condensables 14-26%, gases 9-15%) a la CHT, se identificaron el ácido acético, fórmico, metanol, furfural y  $\text{CO}_2$ .

### 3.4 Comparación entre tratamientos.

Ambos tratamientos tienen diferencias significativas en cuanto a los rendimientos máxicos y energéticos respectivamente, y además, en la composición del carbón producido. En todo el rango de análisis, los rendimientos obtenidos por torrefacción seca superan al proceso de carbonización hidrotermal. Respecto a esta última, el rendimiento en masa sobrepasa escasamente el 50%, debido a que al realizarse en agua a condiciones sub-críticas, además de descomponerse la estructura de la biomasa, se solubilizan azúcares y la fracción inorgánica.

Para evaluar la calidad de los carbones obtenidos por CHT y torrefacción seca, las muestras de sólidos se estudiaron por análisis elemental y los resultados se representan en un diagrama de van Krevelen (Figura 6). Es importante destacar que menores razones O/C y H/C en el diagrama dan cuenta de un mayor grado de carbonización y por ende una calidad superior del carbón como combustible. Para la CHT, sobre un tiempo de procesamiento de 1 hora, se observa que hasta  $218^\circ\text{C}$  la carbonización procede principalmente mediante un mecanismo de decarboxilación, pudiendo esperarse como principal subproducto  $\text{CO}_2$  gaseoso. A mayores temperaturas, tanto la decarboxilación como la deshidratación son los principales mecanismos de carbonización. Sobre  $255^\circ\text{C}$  no se observan cambios significativos en el grado de carbonización, el cual sitúa al material entre el lignito y la turba. Al aumentar el tiempo de procesamiento desde 1 hora hasta 8 horas a  $255^\circ\text{C}$ , tampoco se observan cambios significativos en el grado de carbonización, deduciéndose que el tiempo de procesamiento juega un papel secundario en el proceso de carbonización.

En el caso de la torrefacción seca, el efecto sobre la composición del sólido es menor que para la CHT y se debe a la combinación de la decarboxilación, deshidratación y depolimerización. La biomasa, originalmente formada por una mezcla de polímeros (Tabla 1), tiende a acercarse a la composición de la lignina, lo cual es una evidencia de los postulados presentados anteriormente en referencia a la descomposición de hemicelulosa y

celulosa en el rango de estudio. La calidad del bio-carbón obtenido a  $280^\circ\text{C}$  es comparativamente inferior al bio-carbón-CHT, sin embargo el rendimiento energético alcanzado es notablemente superior en condiciones de operación similares, en concordancia con lo indicado en literatura [Bach et al., 2013].

El poder calorífico del carbón obtenido por CHT a  $255^\circ\text{C}$  y 1 hora (Tabla 2), es muy similar al del carbón importado en Chile ( $29.3 \text{ MJ/kg}$ ). Además, se pudo constatar que es un producto hidrofóbico y frágil, por lo que requiere mucho menos energía que la biomasa natural para lograr los tamaños de partículas requeridos en los sistemas de combustión convencionales.

En la Tabla 2 se comparan los resultados obtenidos en este trabajo y se incluyen algunas referencias sobre estudios similares.

Independientemente del tipo de biomasa, es evidente la superioridad de la torrefacción húmeda frente a los demás pretratamientos para producir un carbón con características cercanas al mineral, sin embargo el rendimiento máxico es bastante menor que en el caso de la torrefacción seca. Se debe añadir que, como la CHT se realiza en medio acuoso, no requiere de un secado inicial de la biomasa. Además, las condiciones y el medio de reacción facilitan el lavado de la biomasa y por ende se obtiene un producto de mejor calidad (menor contenido de inorgánicos) para aplicaciones tales como gasificación y gasificación integrada a la generación de electricidad y Fischer-Tropsch [Prins et al., 2006a]. Sin embargo, debe considerarse que el proceso requiere materiales especiales para soportar la alta presión y corrosión en las condiciones de trabajo y su diseño debe concebir una estrategia para la eliminación y/o recuperación de sustancias orgánicas disueltas en el medio de reacción.

## 4. CONCLUSIONES

Se evaluaron los procesos de torrefacción seca y húmeda a  $220\text{-}280^\circ\text{C}$  y  $218\text{-}300^\circ\text{C}$  respectivamente. Se demostró que el tiempo de residencia tiene menor influencia sobre los rendimientos máxicos y energéticos que la temperatura de operación. Los gases permanentes obtenidos en cada tratamiento están compuestos básicamente por  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ , en el rango de temperaturas estudiado solo se encontraron trazas de  $\text{H}_2$ . La fracción condensable de los volátiles está compuesta por agua, ácidos carboxílicos, furfúricos y otros compuestos orgánicos que se producen por mecanismos de decarboxilación, deshidratación y depolimerización. En cuanto al poder calorífico superior, este es mayor para el proceso CHT que para torrefacción seca, sin embargo esta última alternativa presenta mejores rendimientos, por tanto, se sugiere evaluar económicamente si tiene sentido aplicar el tratamiento CHT a *Pinus radiata*.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Proyectos FONDEF CA12I10375 "Carbonización de biomasa como sustituto de carbón mineral para generación termoeléctrica - HTC", FONDEF B09I1015

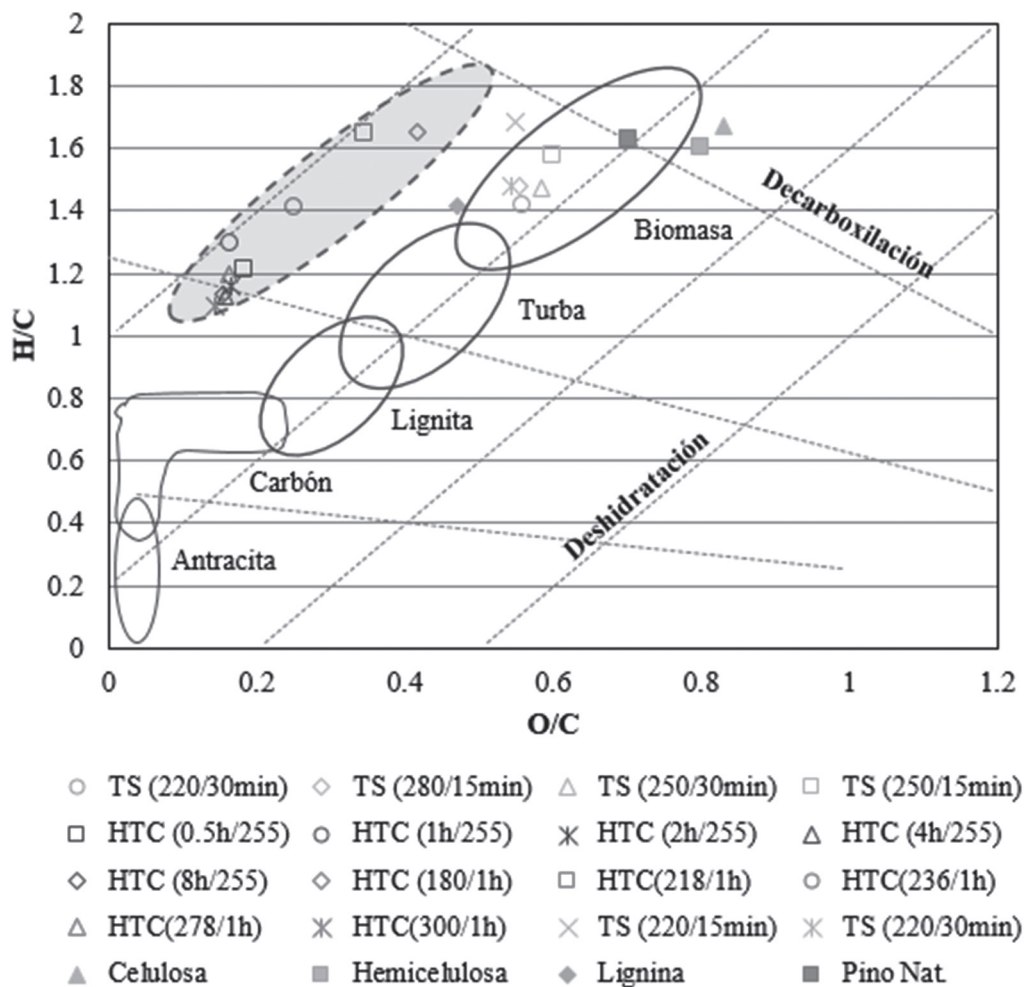


Figura 6. Comparación entre tratamientos según diagrama de van Krevelen

Fuente: Elaboración propia

Biomasa	T (°C)	t (min)	Proceso	O/C	H/C	PCS (MJ/kg)	Fórmula	Ref.
Pinus Radiata	255	60	Húmeda	0.17	1.29	26	$C_{5.8}H_{7.5}O_{1.1}N_{0.1}$	-
Pinus Radiata	280	30	Seca	0.56	1.42	20.6	$C_{4.4}H_{6.2}O_{2.5}N_{0.01}$	-
Eucalipto	240	60	Seca	0.579	1.34	21.8	$C_{4.4}H_{5.9}O_{2.6}N_{0.01}$	(Chen et al. 2015)
Bagazo	250	60	Seca	0.486	1.12	20.9	$C_{4.4}H_{5.0}O_{2.1}N_{0.04}$	(Chen et al. 2015)
Bagazo	180	30	Húmeda	0.78	1.33	18.6	$C_{3.8}H_{5.0}O_{2.9}N_{0.03}$	(Chen et al. 2015)

Tabla 2. Resumen de resultados por ambos pretratamientos

Fuente: Elaboración propia

“Desarrollo de herramientas logísticas y tecnológicas, para el mejoramiento de las propiedades de pellets de madera, mediante un proceso de torrefacción” y BASAL PFB-27.

## REFERENCIAS

- Almeida, G., Brito, J.O. & Perré, P., 2010. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource technology*, 101(24), pp.9778–84.
- Bach, Q.-V. et al., 2013. Comparative Assessment of Wet Torrefaction. *Energy & Fuels*, 27(11), pp.6743–6753.
- Basu, P. et al., 2014. An experimental and theoretical investigation on torrefaction of a large wet wood particle. *Bioresource technology*, 159, pp.215–22.
- Basu, P., 2013. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical design and Theory* Second., New York: Elsevier Ltd.
- Bates, R.B. & Ghoniem, A.F., 2012. Biomass torrefaction: modeling of volatile and solid product evolution kinetics. *Bioresource technology*, 124, pp.460–9.
- Chen, W.-H. & Kuo, P.-C., 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, 36(2), pp.803–811.
- Chen, W.-H., Peng, J. & Bi, X.T., 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, pp.847–866.
- Enger, M., 2014. Ministerio de Energía. *Balance Energético Nacional*. Available at: <http://www.minenergia.cl/documentos/balance-energetico.html> [Accessed October 1, 2014].
- Erlach, B., Harder, B. & Tsatsaronis, G., 2012. Combined hydrothermal carbonization and gasification of biomass with carbon capture. *Energy*, 45(1), pp.329–338.
- González, P. et al., 2007. *Disponibilidad de residuos madereros* Comisión N., Comisión Nacional de Energía.
- Hoekman, S.K., Broch, A. & Robbins, C., 2011. Hydrothermal Carbonization (HTC) of Lignocellulosic Biomass. *Energy & Fuels*, 25(4), pp.1802–1810.
- INFOR, 2014. Forestry Institute. Forest statistics.
- Lu, X. et al., 2013. Influence of reaction time and temperature on product formation and characteristics associated with the hydrothermal carbonization of cellulose. *Bioresource Technology*, 138, pp.180–190.
- Martínez-Saperas, V., 2014. Estado de proyectos de ERNC en Chile. [www.cer.gov.cl](http://www.cer.gov.cl), August(8), pp.5–6.
- Nhuchhen, D., Basu, P. & Acharya, B., 2014. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, pp.1–56.
- Nocquet, T. et al., 2014. Volatile species release during torrefaction of biomass and its macromolecular constituents: Part 2 – Modeling study. *Energy*, 72, pp.188–194.
- Prins, M.J., Ptasiński, K.J. & Janssen, F.J.J.G., 2006a. More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 31(15), pp.3458–3470.
- Prins, M.J., Ptasiński, K.J. & Janssen, F.J.J.G., 2006b. Torrefaction of wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 77(1), pp.28–34.
- Sarvaramini, a., Assima, G.P. & Larachi, F., 2013. Dry torrefaction of biomass – Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model. *Chemical Engineering Journal*, 229, pp.498–507.
- Sevilla, M. & Fuertes, A.B., 2009. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*, 47(9), pp.2281–2289.
- Van der Stelt, M.J.C. et al., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), pp.3748–3762.
- Yan, W. et al., 2010. Mass and Energy Balances of Wet Torrefaction of Lignocellulosic Biomass †. *Energy & Fuels*, 24(9), pp.4738–4742.