



Tecnológico  
de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Maestría en Ciencias Forestales

**Proyecto de graduación**

**“Caracterización de biomasa torrefactada de cinco especies de reforestación  
(*Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y  
*Vochisya ferruginea*) en Costa Rica”**

Gaitán Álvarez Johanna

Diciembre, 2016

## Constancia de Aprobación

**“Caracterización de biomasa torrefactada de cinco especies de reforestación  
(*Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y  
*Vochisya ferruginea*) en Costa Rica”**

**Proyecto final de graduación para optar por el grado de Master en Ciencias  
Forestales.**

### Jurado Examinador

---

Dr. Freddy Muños Acosta

Profesor Lector

---

M. Sc. Allen Puente Urbina

Profesor Lector

---

Ph. D. Jaime Quesada Kimzey

Profesor Lector

---

Dr. Roger Moya Roque

Profesor Tutor

---

Lic. Johanna Gaitán Álvarez

Estudiante

## **Dedicatoria**

El trabajo efectuado se lo dedico a mis padres, que desde siempre han velado porque sea una persona de bien, además de otorgarme esa preciada herencia, que es el estudio. Quienes han estado pendientes de mi bienestar y me han apoyado y guiado en todo momento de mi vida. A mi hermano que me ha servido de gran ejemplo y apoyo para continuar con todas mis metas y propósitos de vida.

## **Agradecimientos**

A la Vicerrectoría de Investigación del Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento de proyecto.

Al departamento de Posgrados de Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento otorgado para que pudiera llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Al CEQIATEC por el préstamo de equipos necesarios para el análisis.

Al CIF por el préstamo y el permiso de utilizar los laboratorios para poder realizar las pruebas experimentales.

Al profesor y tutor Dr. Roger Moya Roque, por toda la dedicación y guía brindada durante el proyecto, así como su confianza al otorgarme participe de este proyecto.

Al profesor Dr. Freddy Muños Acosta por la ayuda brindada durante el proceso de maestría y por su disposición en todo momento a evacuar dudas.

A M. Sc. Allen Puente Urbina por todo el tiempo dedicado en la ayuda durante el proceso de realización de pruebas así como el de análisis.

A los señores Carlos Olivares y Robert Cubero por toda la ayuda y paciencia prestada en los procesos experimentales del trabajo.

*¡Muchas Gracias a todos!*

## Índice General

Artículo Científico.....	1
<b>Resumen</b> .....	1
<b>Palabras Clave</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Keywords</b> .....	3
<b>Introducción</b> .....	4
<b>Materiales y Métodos</b> .....	8
<u>Procedencia y características del material</u> .....	8
<u>Proceso de torrefacción</u> .....	8
<u>Diseño experimental</u> .....	9
<u>Determinación de propiedades energéticas</u> .....	10
<u>Determinación de propiedades químicas</u> .....	10
<u>Análisis Termogravimétrico TGA</u> .....	10
<u>Análisis Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier FTIR</u> .....	11
<u>Análisis estadístico</u> .....	13
<b>Resultados</b> .....	14
<u>Propiedades energéticas</u> .....	16
<u>Propiedades químicas</u> .....	20
<u>Análisis Termogravimétrico TGA</u> .....	25
<u>Análisis Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier IFTR</u> .....	29
<u>Análisis multivariado</u> .....	33
<b>Análisis de Resultados</b> .....	37
<u>Pérdida de masa</u> .....	37
<u>Propiedades energéticas</u> .....	38
<u>Propiedades químicas</u> .....	40
<u>Análisis Termogravimétrico</u> .....	41
<u>Análisis de espectroscopia Infrarrojo por transformada de Fourier IFTR</u> .....	43
<b>Conclusiones</b> .....	46
<b>Recomendaciones</b> .....	47
<b>Referencias</b> .....	49

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de las propiedades determinadas antes y después de la torrefacción, así como las temperaturas y tiempos de torrefacción. ....	9
<b>Figura 2.</b> Pérdida de masa para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	15
<b>Figura 3.</b> Poder calórico para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	20
<b>Figura 4.</b> Descomposición termogravimétrica por pérdida de masa y derivada del peso (%/°C) para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	27
<b>Figura 5.</b> Cambio en la intensidad del radio ( $I_n/T_{1031}$ ) de las bandas para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	31
<b>Figura 6.</b> Relación entre el auto vector del factor 1 y 2 del análisis multivariado por medio de componentes principales para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	35

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Resumen de las bandas FTIR observadas en el rango de 800 and 1800 $\text{cm}^{-1}$ en especies maderables .....	12
<b>Cuadro 2.</b> Porcentaje de cenizas y volátiles para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	18
<b>Cuadro 3.</b> Porcentaje de celulosa y lignina para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.....	23
<b>Cuadro 4.</b> Porcentaje de extractivos en etanol-tolueno, agua fría y agua caliente para la biomasa torrefactada a diferentes temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) y tiempos (minutos) de cinco especies forestales. ....	24
<b>Cuadro 5.</b> Resumen de la energía de activación y el factor de pre exponencial para hemicelulosa y celulosa para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales. ....	28
<b>Cuadro 6.</b> Matriz de correlaciones del análisis multivariado para todas las variables evaluadas para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de torrefacción de cinco especies forestales.....	36



**“Caracterización de biomasa torrefactada de cinco especies de reforestación  
(*Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y  
*Vochisya ferruginea*) en Costa Rica”**

Johanna Gaitán Álvarez

### **Resumen**

Debido a la importancia de los residuos de la industria de la madera y su posible aplicación de la torrefacción a este tipo de biomasa para aumentar la eficiencia energética, es que el presente estudio tiene como objetivo de establecer el cambio energético, químico y cambios en el comportamiento termogravimétrico de biomasa de residuos forestales. Para este análisis se utilizó residuos maderables de *Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochyseae ferruginea*. Las cuales se sometieron a tres tiempos de torrefacción (8, 10 y 12 minutos) y tres diferentes temperaturas (200, 225 y 250 °C). Las variables evaluadas fueron pérdida de masa, poder calórico, porcentaje de cenizas, porcentaje de volátiles, porcentaje de lignina y celulosa, contenido de extractivos, análisis TGA y DTG y análisis de los espectros infrarrojos. Los resultados mostraron que la pérdida de masa en las cinco especies estudiadas varía entre 10 % y 70 %. En las propiedades energéticas evaluadas se obtuvo los porcentajes de cenizas vario entre 0,19 % y 7,00 %. Para el contenido de volátiles se tiene que estos varían entre 63 % y 85 % y son mayores que el testigo. En el caso del poder calórico de la biomasa torrefactada varió entre 17 MJ/kg y 23 MJ/kg, aumentando este valor con el aumento de la temperatura de torrefacción. Para las propiedades químicas se obtuvo que para celulosa los contenidos variaron entre 49,85% y 67,57%. En *D. panamensis*, *Gmelina arborea*, *T.grandis* y *V. ferruginea* el contenido de celulosa aumenta en las torrefacciones de 250°C. En el contenido de lignina los contenidos variaron entre 27,33% y 41,09 %. En los extractivos en agua fría los porcentajes varían entre 3,70% y 16,86%.

En el análisis TGA en las curvas de DTG en las torrefacciones de 250°C no se presentó la señal 290°C y 330°C que representa a la hemicelulosa. *D. panamensis* fue la especie que obtuvo una mejor estabilidad térmica con energías de activación mayores. En el

FTIR se demostró que existe una variación mayor en las torrefacciones a 250°C en las bandas que representan la estructura de hemicelulosa, celulosa y lignina, especialmente la de hemicelulosa. El análisis multivariado mostró que el contenido de lignina, el porcentaje de cenizas, cantidad de extractivos en agua caliente, volátiles, la pérdida de masa, la energía de activación en celulosa y los extractivos son las variables que aportan mayor significancia para agrupar las especies con los diferentes tratamientos de torrefacción. El análisis de estos dos componentes mostró que las torrefacciones a partir de 225°C a 12 minutos presentan mayor degradación de la biomasa y las condiciones de mayor efecto fue la torrefacción en especial la de 250°C a 12 minutos. Las torrefacciones de 200°C a 8, 10 y 12 minutos y la de 225°C a 8 y 10 minutos se pueden clasificar como las más óptimas para torrefaccionar la biomasa. *C. lusitanica* y *D. panamenis* son las especies que presentaron mayor estabilidad térmica ante la torrefacción. Por lo tanto, se recomienda utilizar las torrefacciones ligeras de 200°C a 8, 10 y 12 minutos en todas las especies.

### **Palabras Clave**

Biomasa, torrefacción, degradación térmica, Costa Rica

### **Abstract**

Due to the importance of waste from the wood industry and its possible application of torrefaction to this type of biomass to increase energy efficiency, is that the present study aims to establish the energy, chemical change and changes in the Thermogravimetric behavior of biomass of forest residues. For this analysis wood residues of *Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* and *Vochyseae ferruginea* were used. These were torrefacted in three times (8, 10 and 12 minutes) and three different temperatures (200, 225 and 250 °C). The properties evaluated were mass loss, calorific power, ash percentage, volatile percentage, percentage of lignin and cellulose, extractive content, TGA and DTG analysis and analysis of infrared spectra. The results showed that the loss of mass in the five species studied varies between 10% and 70%. In the energetic properties evaluated, the ash percentages varied between 0.19% and 7.00%. For the volatile content, it is found that these vary between 63% and 85% and are greater than the control. In the case of the calorific value of the torrefaction biomass, it varied between 17 MJ / kg and 23 MJ / kg, increasing this value with the increase of the torrefaction temperature.

For the chemical properties it was obtained that for cellulose the contents varied between 49.85% and 67.57%. In *D. panamensis*, *Gmelina arborea*, *T. grandis* and *V. ferruginea* the cellulose content increases in the torrefactions of 250 ° C. In the lignin, content the contents varied between 27.33% and 41.09. In extractives in cold water, the percentages vary between 3.70% and 16.86%.

In the TGA analysis in the DTG curves at the 250 °C torrefaction the inflection in 290 °C and 330 °C representing the hemicellulose was not present. *D. panamensis* was the species that obtained the best thermal stability with higher activation energies. In the FTIR spectra it was shown that there is a greater variation in the torrefaction at 250 ° C in the bands representing the hemicellulose, cellulose and lignin structure, especially the hemicellulose. The multivariate analysis showed that lignin content, percentage of ash, extractives in hot water, volatiles, loss of mass, activation energy in cellulose and extractives are the variables that contribute most to group the species with the different treatments of torrefaction. The analysis of these two components showed that torrefaction from 225 ° C at 12 minutes presented greater degradation of the biomass especially the torrefaction of 250 ° C at 12 minutes. Torrefaction from 200 ° C at 8, 10 and 12 minutes and the torrefaction from 225 ° C at 8 and 10 minutes can be classified as the optimal for thermal treatment of the biomass. *C. lusitanica* and *D. panamenis* are the species that presented greater thermal stability before torrefaction. Therefore, it is recommended to use light torrefactions of 200 ° C at 8, 10 and 12 minutes in all species.

### **Keywords**

Biomass, torrefaction, thermal stability, Costa Rica

## **Introducción**

El acelerado crecimiento poblacional que se ha incrementado en 2 billones de habitantes solo en la última generación, principalmente en los países desarrollados, y la apertura de nuevas zonas de industrialización (Kannan & Vakeesan, 2016; Keipi et al., 2014), han generado una mayor demanda de energía global y se espera que en el año 2040 haya crecido en un 48% (Fournel et al., 2015; International Energy Outlook, 2016). Por otra parte, el cambio climático es uno de los principales fenómenos ambientales que enfrenta la sociedad a nivel global, este problema se ha incrementado por el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano y óxido nitroso (Wan et al., 2016). En la actualidad, entre las causas que han contribuido al incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera figuran el uso de combustibles fósiles (80-85%), la producción de cemento (3.1%) y el cambio de uso del suelo (30.2%) (Sánchez et al., 2015).

Esta problemática ha hecho que se estudie y se investiguen nuevas formas de obtención de energía, lo que ha fomentado la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías sostenibles que provengan de materias primas renovables (Bach & Skreiberg, 2016). Entre estas se puede considerar la biomasa, ya que es un producto limpio y renovable (Tenorio et al., 2014).

La biomasa ha sido considerada como una fuente de energía renovable atractiva para la generación de energía a base de calor (Roy & Corscadden, 2012). Además de ello, y otras de las ventajas más importantes, es que la biomasa se encuentra ampliamente disponible, produce bajas emisiones de CO<sub>2</sub>, mantiene el ciclo natural del carbono y se considera la única fuente de energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles (Puig-Arnavat et al., 2016). Sin embargo, mientras que otras fuentes de energía renovables han experimentado un gran desarrollo (energía eólica y solar), la biomasa aún no ha cumplido todas las expectativas (Eseltine et al., 2013).

El desarrollo de la biomasa como energía se le señalan algunas desventajas que aún limita su óptimo desempeño: distribución dispersa lo que dificulta su recolección, de forma irregular, de baja densidad de energía, así como problemas para su almacenamiento y el

transporte (Puig-Arnavat et al., 2016). Lo que repercute en la variabilidad de sus propiedades físicas (Ren et al., 2013). Otras de las desventajas que se señalan son: bajo poder calórico, alto contenido de humedad, naturaleza higroscópica, lo que provoca problemas en el transporte eficiente y económico del material, manejo del mismo, almacenamiento y conversión en productos de la biomasa (Athanasios et al., 2009).

La biomasa lignocelulósica es la que contiene mayor capacidad para generar energía renovable, esta se puede encontrar en residuos de diferentes industrias agrícolas y forestales (Bahng et al., 2009; Gokcol et al., 2009). Este tipo de biomasa, proveniente del sector forestal presenta gran potencial abastecimientos de energía debido a su baja humedad y bajo contenido de cenizas en relación a otros tipos de biomasa (Bach & Tran, 2015). En el proceso de producción de madera, la silvicultura de plantaciones está orientada a la obtención de madera sólida para aserrío, de modo que un porcentaje alto del volumen del árbol son transformados en residuos con potencial de utilización (Gómez et al., 2012).

Costa Rica, debido a su condición de clima tropical, permite el desarrollo de muchos cultivos. Sin embargo, la generación de residuos lignocelulósicos se ha convertido en un problema importante (Ulloa et al., 2004). Según Coto (2013), la producción de biomasa húmeda en Costa Rica es cerca de 27 millones de toneladas anuales, de estas los sectores agrícolas y de aserraderos (industria primaria forestal) representan cerca del 52%. El aprovechamiento de estos residuos se considera limitado y más bien representa costos de manipulación y eliminación, restricciones y hasta riesgos ambientales e industriales al sector como generación de lixiviados no tratados, emisiones de gases de efecto invernadero y riesgos de incendio (Chacón, 2012).

Costa Rica, como se indicó, al ser un país de clima tropical, se da positivamente la adaptación de plantaciones forestales de diferentes especies tanto nativas como exóticas (Moya, 2004). Entre estas se puede mencionar *Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochisya ferruginea*, que son consideradas importantes para el sector forestal tanto por la calidad de su madera como por la adaptación a diferentes ecosistemas (Petit & Montagnini, 2004). Sin embargo, durante su industrialización se producen una gran cantidad de residuos tanto en la etapa de aprovechamiento como de

producción de madera (Serrano y Moya, 2011). Pero como se ha indicado, dichos residuos tienen el potencial de ser aprovechados como energía (Aragón-Garita et al. 2014; Tenorio et al., 2014). Sin embargo, como todo tipo de biomasa en Costa Rica, existen pocos estudios que muestren su potencial energético o la posibilidad de aumentar este potencial (Tenorio & Moya, 2012).

Dadas las características propias de la biomasa generada por la industria primaria forestal, es que se debe someter a tratamientos para mejorar sus condiciones naturales. Las tecnologías que utilizan el tratamiento térmico de la biomasa representan una salida para la conversión de esta en energía por medio de la combustión; pues pueden solucionar algunas de las dificultades antes expuestas (Medic et al., 2012). Dentro de estos tratamientos térmicos, la torrefacción parece ser una respuesta efectiva (Chen et al., 2015). Wang et al., (2011) y Peng et al., (2013) concuerdan en que la torrefacción aumenta la densidad energética de la biomasa y su resistencia a la humedad. La torrefacción de biomasa se lleva a cabo a temperaturas entre 200 y 300 °C con una duración de minutos a horas, casi siempre a presión atmosférica y en presencia de una atmósfera inerte. Durante este tipo de pretratamiento incluyen beneficios tales como: alto poder calórico, disminución atómica de enlaces O/C y H/C, menor contenido de humedad, mayor hidrofobicidad, mejora la capacidad de molienda entre otras entre otras (Van der Stelt et al., 2011; Chew et al., 2011; Ciolkosz & Wallace, 2011).

En recientes investigaciones, se ha estudiado el comportamiento del material biomásico ante la torrefacción y se ha logrado determinar que la lignina es un componente valioso de medir en la madera al igual que la celulosa y la hemicelulosa (Brebú & Vasile, 2010). La lignina es la segunda gran fuente de materia prima orgánica, constituye aproximadamente el 4-35 % en peso de la mayoría de la biomasa, de 16-25 % en peso de maderas duras y 23-35 % en peso de maderas suaves (Bridgewater, 2004; Gosselink et al., 2004). Señalando que la eficiencia y niveles de emisiones de combustión, en los sistemas de combustión de biomasa vegetal dependen de las propiedades del combustible, así como de las condiciones de funcionamiento del material (Janvijitsakul, 2008).

Por lo anterior, es de suma importancia cuantificar estos componentes que contiene la biomasa (celulosa, lignina y hemicelulosa). Estas propiedades pueden ser cuantificadas

mediante técnicas como TGA (análisis termogravimétrico) y FTIR (análisis infrarrojo). El primer análisis nos da una indicación de la relación de hemicelulosa / celulosa / lignina (Vassilev et al., 2010), que son los parámetros de mayor importancia que afecta a la cinética de degradación del material. También se obtiene curvas de descomposición DTG para calcular el contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina (Amutio et al., 2012; Conesa & Domene, 2011). Esto para obtener la composición estructural del material al aplicarle tratamientos de torrefacción.

FTIR es un análisis de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier, en el cual se puede monitorear la descomposición de la biomasa al igual que los volátiles que se generan en el proceso de descomposición y torrefacción (Nistor & Vasile, 2013). Esta información sobre el tipo, la cantidad y el tiempo de lanzamiento de productos gaseosos es esencial para obtener una comprensión completa de los fundamentos y mecanismos implicados en el proceso de descomposición térmica del material y también para formular estrategias eficaces de control de la contaminación al elaborar biomasa útil para procesos de generación de energía (Parshetti et al., 2014). Resaltando la importancia de este proceso para la comprobación de que no existan sustancias contaminantes generadas del proceso de torrefacción de la biomasa.

Debido a la generación constante de residuos en la industria de la madera y su posible aplicación de la torrefacción a este tipo de biomasa (Gáitan-Álvarez & Moya, 2016), es que el presente proyecto tiene como objetivo establecer el cambio energético (poder calórico, porcentaje de cenizas y porcentaje de volátiles), químico (porcentaje de lignina y celulosa, contenido de extractivos) y cambios en el comportamiento termogravimétrico y en el espectro infrarrojo de biomasa proveniente de 5 especies maderables de plantación, sometidas a 3 temperaturas y 3 periodos de tiempos de torrefacción. Este estudio permitirá mejorar el tratamiento de la biomasa y así obtener materias primas renovables viables para la generación de energía limpia.

## **Materiales y Métodos**

### Procedencia y características del material

Se utilizó residuos maderables de las especies *Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochyseia ferruginea*, provenientes de plantaciones de rápido crecimiento en diferentes sitios de Costa Rica. La edad de las plantaciones que se utilizaron oscila entre los 8 y 14 años. Para todas las especies el aserrín se obtuvo recolectándolo directamente del proceso de aserrío. El aserrín una vez recolectado se dejó secar al aire hasta alcanzar aproximadamente 14% de contenido de humedad, que es la condición de contenido de humedad de equilibrio donde se realizan las pruebas. Se utilizó un tamiz entre 40 y 60 mesh, obteniendo un tamaño de partículas entre 250  $\mu\text{m}$  y 425  $\mu\text{m}$ .

### Proceso de torrefacción

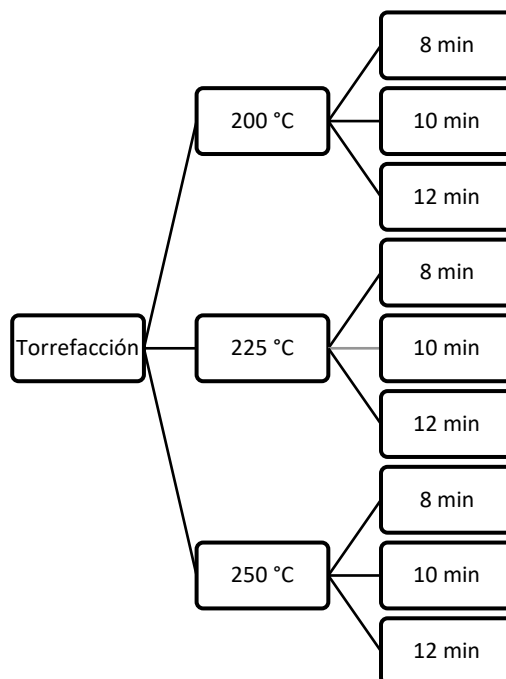
Se tomó aproximadamente 500 gramos de aserrín de cada especie y se dividió para aplicar tres tiempos diferentes de exposición del material a la torrefacción (8, 10 y 12 minutos) y tres diferentes temperaturas (200, 225 y 250°C), teniendo por especie nueve tratamientos. Este proceso se utilizó una mufla marca Thermolyne Furnace 48000 y para controlar el flujo de aire se selló y cada 4-5 minutos se liberó el aire por una llave de paso para evitar el ingreso de oxígeno y evitar la combustión del material en el momento que se realice el proceso de torrefacción (Gáitan-Álvarez y Moya, 2016)

### Propiedades de biomasa:

Pirolisis 25-800 °C, lignina, celulosa, contenido de cenizas, contenido de volátiles, poder calórico neto extractivos en agua (caliente y fría), y en solución etanol-tolueno.

### Propiedades de la biomasa torrefactada:

Pérdida de masa después de la torrefacción. Contenido de lignina, contenido de celulosa, contenido de cenizas, contenido de volátiles, poder calórico neto extractivos en agua (caliente y fría), y en solución etanol-



**Figura 1.** Esquema de las propiedades determinadas antes y después de la torrefacción, así como las temperaturas y tiempos de torrefacción.

### Diseño experimental

El diseño experimental del proyecto consta de un diseño factorial de nivel dos, donde cada nivel corresponde a las variables dependientes a evaluar. El nivel uno correspondió a al tiempo de exposición de la biomasa a la torrefacción, se consideraron tres tiempos, a 8 minutos, a 10 minutos y a 12 minutos. El segundo nivel factorial fue la temperatura a la cual se le aplicó a la biomasa, en este nivel se tienen definieron tres temperaturas, a 200°C, a 225°C y a 250°C. Este diseño se aplicó para cada una de las especies estudiadas en el proyecto (*Cupressus lusitanica*, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Vochyseae ferruginea*). Obteniendo así un análisis factorial de grado dos por especie, este diseño se repitió una única vez por especie y para cada uno de los ensayos realizados se utilizaron tres muestras.

### Determinación de propiedades energéticas

El poder calórico neto (CVN) se determinó sin presencia de agua (0% contenido de humedad). La determinación del CVN se realizó usando la prueba calorimétrica de Parr's en el equipo con modelo 6725 Semimicro Calorimeter, mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2003). En relación con el porcentaje de cenizas se siguió el procedimiento detallado en la norma ASTM D 1102-84 (ASTM, 2013), para este se debe utilizar una muestra de aserrín de g. El contenido de humedad (CH) de la biomasa se va determinó mediante una balanza de humedad modelo MB45, marca OHAUS, que determinó la humedad en relación al peso inicial. Para el cálculo del porcentaje de volátiles se van a utilizaron muestras de 3 g, siguiendo lo estipulado en norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013).

### Determinación de propiedades químicas

El porcentaje lignina del material se va obtuvo mediante el procedimiento descrito en la norma TAPPI T22 om-02 (TAPPI, 2002). Para el porcentaje de celulosa se va utilizó el procedimiento de la norma TAPPI T 17 wd-70 (TAPPI, 1997). Para el cálculo de porcentaje de extractivos en etanol y tolueno se siguió el procedimiento de la norma ASTM D-1107-96 (ASTM, 2013), agua caliente y agua fría con la norma ASTM D-1110-84 (ASTM, 2013).

### Análisis termogravimétrico TGA

La curva de descomposición de análisis termogravimétrico (TGA) se llevó a cabo a presión atmosférica en un ambiente inerte utilizando alrededor de 5 mg del aserrín previamente torrefaccionado de cada una de las especies. El rango de calentamiento fue de 20 °C/min en una atmósfera de nitrógeno ( $N_2$  UAP, 100 mL/min) llegando a una temperatura máxima de 800 °C. Se utilizó un Analizador Termogravimétrico modelo SDT Q600 marca TA Instruments. El análisis TGA proporciona los valores de la pérdida de masa en relación a la temperatura y a partir de ellas se obtienen las derivadas del porcentaje de masa con respecto a la temperatura DTG) con el objetivo de determinar el rango y la temperatura a la cual se lleva a cabo la descomposición de las muestras. Las curvas de TGA y DTG fueron analizadas utilizando el programa A Instruments Universal Analysis 2000.

Para realizar el análisis de estabilidad térmica se utilizó el programa Magic Plot donde se identificaron los puntos de descomposición de hemicelulosa y celulosa. Obteniendo esta información se desarrolló el modelo descrito en la Ecuación 2 la cual proviene del modelo linealizado que se presenta en la ecuación 1 propuesto por (Vyazovkin & Sbirrazzuoli, 2003); con el objetivo de calcular la energía de activación de la descomposición de cada componente del material en estudio (hemicelulosa y celulosa).

$$K = K_0 * e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln K_0 + \left(\frac{-E}{RT}\right) + n \ln(1 - \alpha) \quad (2)$$

Donde:  $\alpha$ : es la pérdida de masa,  $da/dt$ : tasa de pérdida de masa en función del tiempo,  $K_0$ : factor de entropía.

E: energía de activación, and T: temperatura.

#### Análisis de espectroscopia de Infrarrojo por transformadas de Fourier FTIR

El análisis infrarrojo se realizó en un analizador Nicolet 380 Thermo Fisher Scientific, de marca Thermo Scientific, con implemento Smart iTR marca Thermo Scientific. Se realizaron mediciones con 32 barridos tanto para la muestra como para el fondo. Todas las mediciones tienen una resolución de  $0,482 \text{ cm}^{-1}$ , este análisis se aplicó a la biomasa torrefaccionada en diferentes temperaturas.

Los espectros obtenidos fueron procesados en el programa OMNIC. Se aplicó una corrección de línea base entre el rango de  $1800$  a  $800 \text{ cm}^{-1}$  y se identificaron las principales señales en la banda. Fue seleccionada esta banda ya que varios trabajos han determinado que es el rango donde más ocurre variación de las propiedades de vibración de la madera (Calienzo et al., 2015, Li et al., 2015) y estas son detalladas en la Tabla 1. Se tomó como referencia el pico de  $1031 \text{ cm}^{-1}$ , por la estabilidad que presentó en todos los espectros estudiados. Luego se calculó la relación entre los diversos picos en el intervalo de  $800$  a  $1800 \text{ cm}^{-1}$  (Ecuación 3), con respecto a la banda de  $1031 \text{ cm}^{-1}$  para todos los tratamientos. Entonces fue calculado el radio entre los diferentes picos en el rango entre  $800$  a  $1800 \text{ cm}^{-1}$  (Ecuación 3) y la intensidad de  $1031 \text{ cm}^{-1}$  en todos los diferentes procesos de torrefacción de biomasa.

$$\text{Radio de Intensidad } (I_n/T_{1031}) = \frac{\text{Intensidad del pico entre } 1800 \text{ a } 800 \text{ cm}^{-1}}{\text{Intensidad de la señal a } 1031 \text{ cm}^{-1}} \quad (3)$$

**Cuadro 1.** Resumen de las bandas FTIR observadas en el rango de 800 and 1800  $\text{cm}^{-1}$  en especies maderables

S/N	Posición ( $\text{cm}^{-1}$ )	Asignación de señal	Polímero representante
Picos presentes en especies maderables			
1	810	C=O	Glucomanano
2	1031	C-O enlace	Celulosa y hemicelulosa
3	1053	C-O enlace	Celulosa y hemicelulosa
4	1108	Cadena de aromático y enlace C-O	Polisacáridos y lignina
5	1158	C-O-C vibración	Celulosa y hemicelulosa
6	1231	C-O anillo siringil	Lignina
7	1318	C-O vibración	Lignina
8	1373	C-H deformación	Celulosa and hemicelulosa
9	1419	C-H deformación con anillo aromático	Lignina
10	1453	CH deformación, asimetría en $\text{CH}_3$ y $\text{CH}_2$	Celulosa
16	1506	Vibración de cadenas de aromáticos (C=C)	Lignina
19	1595	Vibración de cadenas de aromáticos (C=C)	Lignina
24	1652	Conjugaciones de C=O combinados con C=O enlaces de diferentes grupos	Hemicelulosa
25	1717	C=O enlaces	Ácidos carboxilos en lignina
26	1733	Conjugaciones de C=O	Xilano en hemicelulosas
Picos presentes en especies maderables			
	1616	Vibración de cadenas de aromáticos (C=C)	Taninos
	1635	Vibración de cadenas de aromáticos (C=C)	Taninos
	1675	C=O enlaces conjugados con aromáticos	Lignina

Fuente: Li et al, Bonifazi et al., 2015

### Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para todas las variables. Además, primero se verificó si las variables cumplían con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas. Para el análisis de varianza de las propiedades de la biomasa ante la torrefacción se utilizó el modelo detallado en la ecuación 4. Este análisis de varianza ANOVA se va utilizó para verificar la existencia de diferencias significativas entre los promedios de las variables ( $P < 0,05$ ) y finalmente se aplicó la prueba de Tukey para determinar las diferencias estadísticas entre las medias. Este análisis se va corrió en el programa InfoStat.

$$Y = \mu + t_i + T_i + t_i * T_i + e_i \quad (4)$$

Donde:

$Y_i$ : es la observación de cada propiedad de la biomasa

$M$ : es la media general,

$t_i$ : es el efecto aleatorio del tiempo de la torrefacción

$T_i$  es el efecto aleatorio de la temperatura de la torrefacción

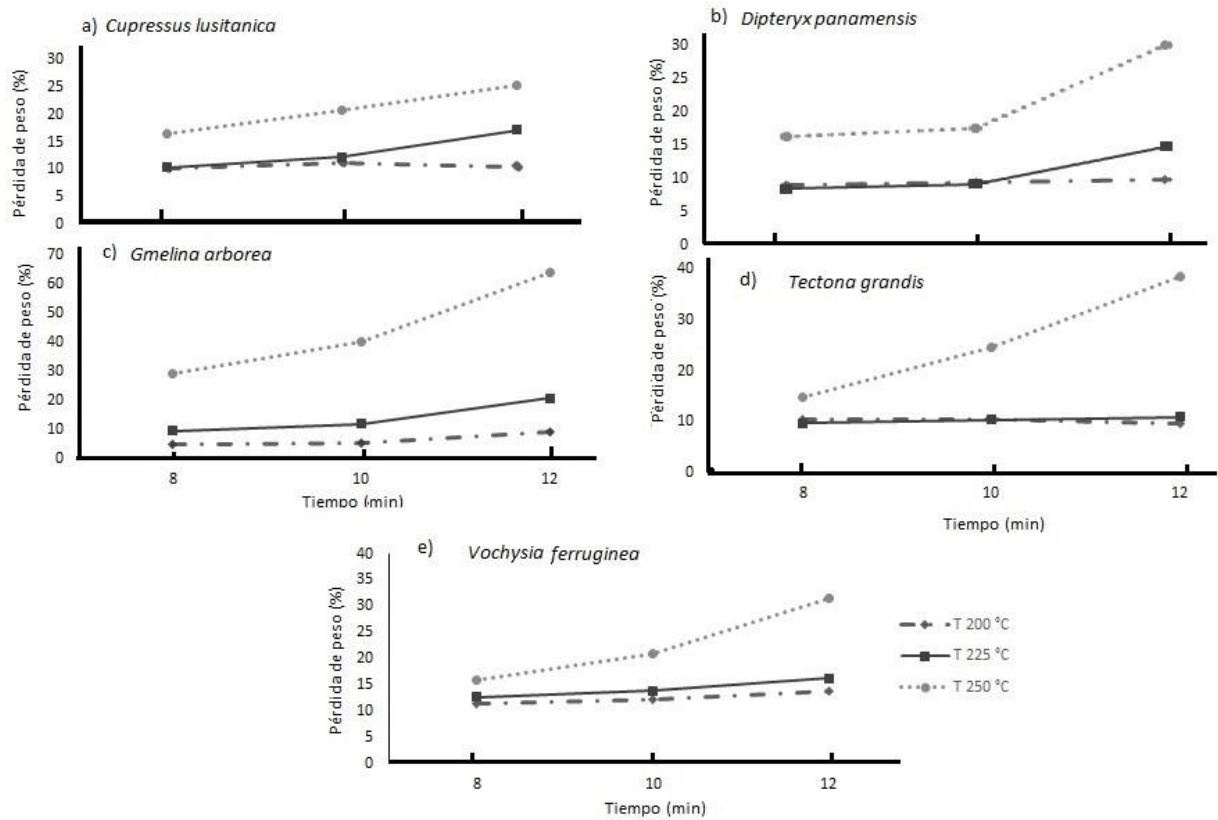
$t_i * T_i$ : efecto de la interacción del tiempo y la temperatura

$e_i$ : es el efecto aleatorio residual o el error.

## Resultados

Como es esperar se presenta una pérdida de masa con la torrefacción, la cual varía entre el 10% y el 70% según especie, temperatura o tiempo de torrefacción (Figura 2). La biomasa que presentó la menor pérdida de masa con la torrefacción fue cuando esta se trató a 200 °C en periodos de tiempo de 8, 10 y 12 minutos en las cinco especies estudiadas (Figura 2). Por el contrario, los mayores porcentajes de pérdida de masa en biomasa se presentaron cuando la torrefacción se hace a 250 °C y tiempos de 8, 10 y 12 minutos (Figura 2). Fue también comprobado que cuando la biomasa se torrefacciona a 250 °C en tiempos 12 minutos ocurre la mayor pérdida de peso en todas las especies (Figura 2). También fue posible observar que en todas las especies la utilización de temperaturas de 200°C y 225°C en la torrefacción, la disminución de la masa fue un promedio de 10%, pero cuando se utiliza una temperatura de 250°C, la pérdida de masa es superior al 20%.

Con respecto a los tiempos de torrefacción, se observó que la temperatura de 200°C en torrefacción presenta una pérdida relativamente constante con los tiempos de torrefacción en todas las especies. En la temperatura de 225°C se observa que existe un aumento en la pérdida de masa en el tiempo de 12 minutos especialmente en *C. lusitanica* (Figura 2a), *D. panamensis* (Figura 2b), *G. arbórea* (Figura 2c) y *V. ferruginea* (Figura 2e), luego que la pérdida de masa fue similar en los 8 y 10 minutos de torrefacción en las todas las especies. Finalmente, en la torrefacción de 250°C hay un incremento relativamente constante con el aumento del tiempo de torrefacción en *C. lusitanica*, *G. arborea*, *T. grandis* y *V. ferruginea* (Figura 2a, 2c-e) y en *D. panamensis* la torrefacción a 250°C en los tiempos de 8 y 10 minutos fueron similares, pero hay un incremento de la pérdida de peso en el tiempo de 12 min a esa temperatura (Figura 2b).



**Figura 2.** Pérdida de masa para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

### Propiedades energéticas

En la Cuadro 2 se presentan los resultados de porcentajes de cenizas y volátiles obtenidos en las diferentes biomásas torrefactadas. En general se observa que la torrefacción entre 200 °C y 225 °C el porcentaje de cenizas es menor que la biomasa no torrefactada. El porcentaje cenizas varía entre 0,19 % a 7,00 %, siendo *C. lusitanica* la que obtuvo menor porcentaje de cenizas en las temperatura de torrefacción de bajo 225 °C, sin embargo esta especie junto con *G. arborea* y *V. guatemalensis* en la torrefacción de 250°C a 10 y 12 minutos presentaron los mayores porcentaje de cenizas. La biomasa torrefaccionado de *D. panamensis*, la torrefacción disminuye el porcentaje de cenizas con respecto al testigo y los termotratamientos de 200°C a 12 minutos, 225°C a 8 minutos y 250°C a 10 y 12 minutos no presentan diferencias estadísticas entre ellos. *G. arborea* y *V. ferruginea* solamente el termotratamiento de 250°C a 10 y 12 minutos el porcentaje de ceniza fue fueron estadísticamente mayor en relación con el resto de las temperaturas de torrefacción y la biomasa no torrefactada. Finalmente, la biomasa de torrefaccionado de *Tectona grandis* la torrefacción disminuyó la cantidad de cenizas (Cuadro 2).

Los porcentajes de volátiles en la biomasa torrefactada variaron entre 68,77% a 84,94% (Cuadro 2). En general se observa que cuando la biomasa se torrefacciona a temperaturas de 200 °C y 225°C los porcentajes de volátiles aumentan en relación al testigo, pero cuando la biomasa es torrefaccionada a 250°C, el porcentaje de volátiles disminuyen. En la biomasa de *C. lusitanica*, la torrefacción aumento los porcentajes de volátiles a las temperaturas de 200°C, 225°C hasta la torrefacción de 250 °C y una duración de 8 minutos, en los cuales no se presentaron diferencias estadísticas entre ellos. En tanto que la torrefacción de 10 y 12 minutos a 250°C estos disminuyen en relación al resto de temperatura de termotratamiento. Para la biomasa de *D. panamensis*, no existe un aumento en el porcentaje de volátiles hasta llegar a una temperatura de torrefacción de 225°C y una duración de 8 minutos. Luego de en la temperatura de torrefacción de 225°C y una duración de 10 y 12 minutos aumentan el porcentaje de volátiles, luego en las temperaturas de torrefacción de 250°C a 10 y 12 minutos los volátiles decrecen (Tabla 2).

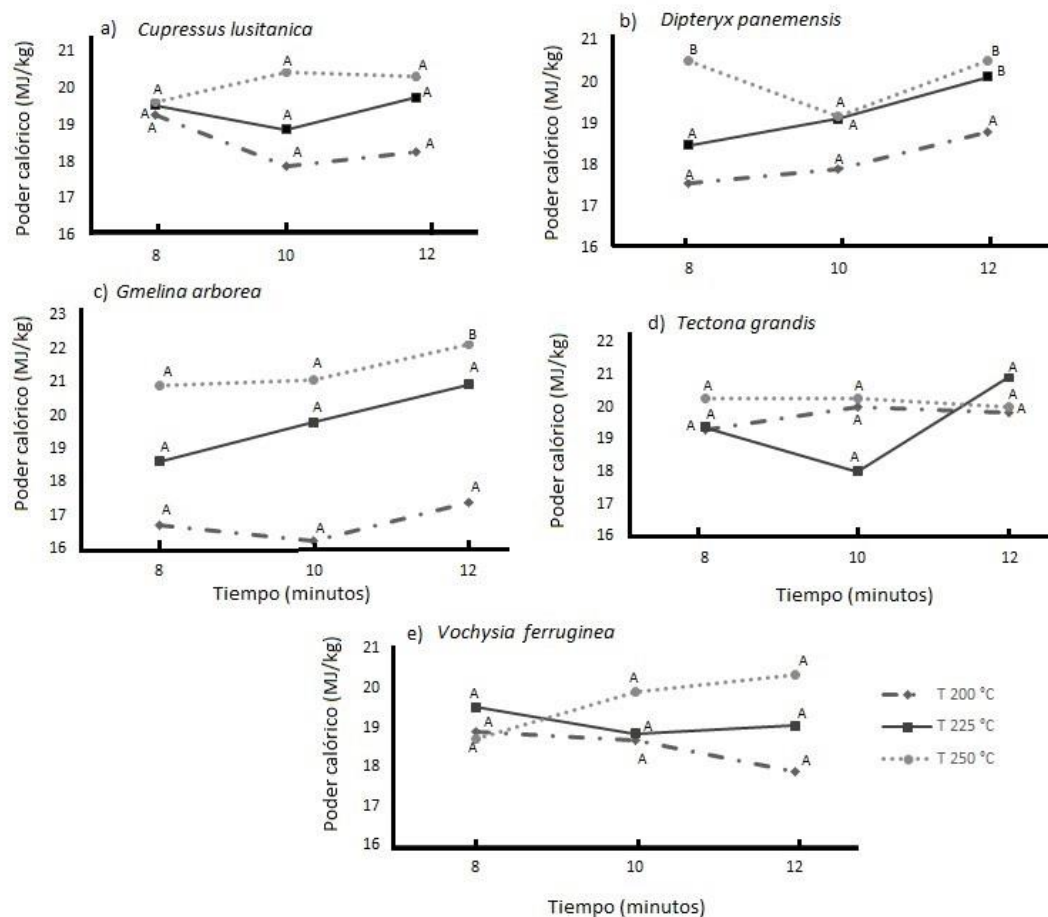
Para la biomasa de *G. arborea* la torrefacción aumenta el contenido de volátiles en temperaturas entre los 200 °C en los diferentes tiempos y 225°C hasta los 10 minutos, posteriormente de la torrefacción a 250 °C en los diferentes tiempos y a 225 °C con 12 minutos de duración disminuye el porcentaje de volátiles. En el caso de *T. grandis* la torrefacción de 200 °C para todos los tiempos, 225 °C a 8 minutos y 250°C a 8 minutos los volátiles aumentan, sin embargo, en 225°C a 12 minutos y 250°C a 12 minutos estos disminuyen. En *V. ferruginea* la torrefacción de biomasa aumentando el contenido de volátiles hasta la temperatura de 250°C a 8 minutos, posterior a esta temperatura los porcentajes disminuyen para la torrefacción de 250°C a 10 minutos y 250°C a 12 minutos.

**Cuadro 2.** Porcentaje de cenizas y volátiles para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	<i>Cupressus lusitánica</i>		<i>Dipteryx panamensis</i>		<i>Gmelina arborea</i>		<i>Tectona grandis</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
		Cenizas (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)
200	Testigo	0,19 <sup>A</sup> (9,85)	80,45 <sup>A</sup> (1,54)	1,83 <sup>A</sup> (89,67)	82,37 <sup>A</sup> (0,70)	1,00 <sup>A</sup> (3,26)	80,51 <sup>A</sup> (0,71)	2,78 <sup>A</sup> (2,49)	81,75 <sup>A</sup> (0,23)	0,99 <sup>A</sup> (1,50)	80,36 <sup>A</sup> (0,83)
	8	0,08 <sup>A</sup> (8,25)	85,17 <sup>B</sup> (0,21)	0,24 <sup>B</sup> (15,24)	82,03 <sup>A</sup> (0,63)	0,72 <sup>A</sup> (14,24)	87,47 <sup>B</sup> (0,69)	0,66 <sup>B</sup> (14,97)	85,10 <sup>B</sup> (0,29)	1,49 <sup>A</sup> (17,66)	83,72 <sup>B</sup> (0,71)
	10	0,12 <sup>A</sup> (22,46)	85,36 <sup>B</sup> (0,75)	0,25 <sup>C</sup> (13,47)	82,82 <sup>A</sup> (0,32)	0,77 <sup>A</sup> (2,08)	83,83 <sup>C</sup> (1,83)	0,55 <sup>B</sup> (2,27)	85,95 <sup>B</sup> (0,41)	1,12 <sup>A</sup> (16,95)	83,02 <sup>B</sup> (0,15)
	12	0,09 <sup>A</sup> (3,34)	85,08 <sup>B</sup> (0,37)	1,52 <sup>A</sup> (17,31)	82,87 <sup>A</sup> (0,28)	0,72 <sup>A</sup> (2,47)	85,90 <sup>C</sup> (0,88)	0,60 <sup>B</sup> (4,70)	85,70 <sup>B</sup> (0,30)	1,31 <sup>A</sup> (15,70)	84,59 <sup>B</sup> (0,57)
225	8	0,08 <sup>A</sup> (2,97)	84,64 <sup>B</sup> (0,70)	1,54 <sup>A</sup> (17,25)	83,74 <sup>A</sup> (0,31)	0,60 <sup>A</sup> (11,02)	86,43 <sup>C</sup> (0,67)	0,55 <sup>B</sup> (1,50)	85,18 <sup>B</sup> (0,39)	1,30 <sup>A</sup> (4,73)	83,67 <sup>B</sup> (0,47)
	10	0,22 <sup>A</sup> (19,45)	84,22 <sup>B</sup> (0,45)	0,23 <sup>BC</sup> (6,97)	85,84 <sup>B</sup> (0,31)	1,05 <sup>A</sup> (7,27)	85,04 <sup>C</sup> (0,49)	0,60 <sup>B</sup> (22,42)	83,86 <sup>C</sup> (0,31)	1,52 <sup>A</sup> (20,83)	83,08 <sup>B</sup> (0,81)
	12	0,33 <sup>A</sup> (13,80)	83,32 <sup>B</sup> (0,33)	0,16 <sup>BC</sup> (16,80)	84,94 <sup>B</sup> (0,77)	1,81 <sup>A</sup> (2,37)	68,77 <sup>D</sup> (0,58)	1,81 <sup>B</sup> (2,37)	68,77 <sup>C</sup> (0,58)	1,30 <sup>A</sup> (11,23)	81,36 <sup>A</sup> (2,89)
250	8	0,26 <sup>A</sup> (20,92)	82,63 <sup>B</sup> (1,01)	0,24 <sup>BC</sup> (19,09)	80,99 <sup>A</sup> (0,77)	1,36 <sup>A</sup> (2,79)	72,63 <sup>E</sup> (0,48)	0,66 <sup>B</sup> (0,74)	84,12 <sup>C</sup> (0,40)	1,30 <sup>A</sup> (21,64)	82,57 <sup>A</sup> (0,66)
	10	4,84 <sup>B</sup> (22,65)	79,93 <sup>C</sup> (0,48)	0,33 <sup>A</sup> (8,16)	78,94 <sup>C</sup> (0,37)	3,42 <sup>B</sup> (7,22)	63,41 <sup>F</sup> (1,49)	0,81 <sup>B</sup> (11,18)	81,14 <sup>A</sup> (0,85)	4,82 <sup>B</sup> (23,94)	79,94 <sup>A</sup> (0,37)
	12	7,00 <sup>C</sup> (9,88)	75,35 <sup>D</sup> (1,13)	0,72 <sup>A</sup> (9,86)	79,77 <sup>C</sup> (2,58)	5,59 <sup>C</sup> (16,83)	67,62 (1,68) <sup>G</sup>	1,05 <sup>C</sup> (2,97)	76,91 <sup>D</sup> (0,53)	7,00 <sup>C</sup> (9,25)	75,35 <sup>C</sup> (0,43)

Nota: letra al lado del número representa nivel de significancia estadística a 95% entre torrefacciones, número entre paréntesis los coeficientes de variación.

En el caso del poder calórico de la biomasa torrefactada a los diferentes tiempos y temperaturas evaluados varió entre 17 MJ/kg y 23 MJ/kg. En el caso de *C. lusitanica* ninguna temperatura de torrefacción en los diferentes tiempos presentaron diferencias estadísticas entre ellas (Figura 3a). En *D. panamenisis* se observa un ligero aumento del poder calórico con la temperatura y tiempo de torrefacción, sin embargo, fue estadísticamente diferente en la biomasa torrefacionada a 225°C y 250°C a 12 minutos (Figura 3b). En *G. arborea* la torrefacción a los 200 °C fue la que presentó los valores más bajos de poder calórico, mientras que en la torrefacción a los 225 °C y 250°C para todos los tiempos se presentó un aumento en los valores, sin embargo, el único que presentó diferencias significativas fue la biomasa a 250°C a 12 minutos, la cual obtuvo el valor más alto (Figura 3c). En *T. grandis* no se presentaron diferencias significativas entre las temperaturas y tiempos de torrefacción manteniéndose los valores de poder calórico en un rango de 18 MJ/Kg a 21 MJ/kg (Figura 3d). En *V. ferruginea* no se presentaron diferencias estadísticas entre torrefacción a las diferentes temperaturas y tiempos de la biomasa, manteniéndose en un rango de los 18 MJ/kg a los 20 MJ/Kg (Figura 3e).



**Figura 3.** Poder calórico para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

### Propiedades químicas

En la cuantificación del porcentaje de celulosa de *C. lusitanica* se encontró que este valor varió entre 54,72% a 64,71% (Cuadro 3) y que cuando esta biomasa se torrefaciona en las condiciones probadas, solamente la torrefacción a 200°C a 12 minutos y 225°C a 10 minutos disminuye la cantidad de celulosa. En el caso de *D. panamensis* la torrefacción aumenta el contenido de celulosa cuando la biomasa se torrefaciona a 250°C en los diferentes tiempos. Para *G. arborea* el porcentaje de celulosa aumentó solamente cuando la biomasa es

torrefactada a 250°C a 10 minutos. Para la especie *T. grandis* el único proceso de torrefacción que presentó un aumento de celulosa a 250°C a 12 minutos. La biomasa de *V. ferruginea* las condiciones que aumentaron significativamente la celulosa fueron las torrefacciones de 225 °C a 10 y 12 minutos y 250 °C a 10 minutos (Cuadro 2).

En relación con el porcentaje lignina fue observado que *C. lusitanica* presentó valores entre 27,33 % y 41,09 %; obteniendo la torrefacción a 225 °C y 10 minutos el porcentaje más bajo y el más alto estadísticamente en la biomasa torrefactada a 250 °C con un tiempo de 12 minuto (Cuadro 3). En el caso de *D. panamensis* la torrefacción aumentó estadísticamente los contenidos de lignina en torrefacción a 250 °C con tiempos de 8, 10 y 12 minutos. *G. arborea*, la torrefacción con temperaturas bajas disminuyó el porcentaje de lignina hasta llegar a los 225°C con un tiempo de 8 minutos, luego el contenido de lignina aumentó en la biomasa torrefactada a 250 °C con tiempos de 10 minutos, pero luego disminuyó la cantidad de lignina en biomasa con temperatura de 250 °C y tiempos de 12 minutos. En el caso de *T. grandis* los contenidos de lignina aumentaron con la torrefacción, siendo la torrefacción a 250 °C y 12 minutos la que presentó el valor más alto. En *V. ferruginea* se presentó un aumento de la cantidad de cenizas con el aumento de la temperatura y tiempo de torrefacción.

Los porcentajes de extractivos de la biomasa en etanol-tolueno, agua fría y agua caliente se presentan en la Cuadro 4. Para *C. lusitanica* *G. arborea* y *T. grandis* la torrefacción aumento el contenido de extractivos en etanol-tolueno en todas las temperaturas y tiempos. En la biomasa de *D. panamensis* la torrefacción disminuyó los contenidos de extractivos en la biomasa y la biomasa de *V. ferruginea* los extractivos en etanol-tolueno disminuyeron, siendo la torrefacción a 200°C y 8 y 12 minutos, la de 225°C a 10 minutos y la de 250°C a 12 minutos con los menores valores.

En relación a los extractivos en agua fría, se observó que la biomasa de *C. lusitanica* los extractivos aumentaron. En la biomasa de *D. panamensis* la torrefacción disminuyó el contenido de extractivos solubles en agua fría. En la biomasa de *G. arborea* disminuyó con temperatura de torrefacción de 200°C a 8 minutos, la temperatura de 225°C a 12 minutos y la temperatura de 225°C a 10 a 12 minutos. En biomasa de *T. grandis* la torrefacción disminuyó el contenido de extractivos en agua en la torrefacción de 225°C a 12 minutos y las temperaturas de 250°C a 10 y 12 minutos. Para la biomasa de *V. ferruginea* la torrefacción

disminuyó los extractivos en agua fría, no evidenciando diferencias significativas entre las biomásas torrefactadas (Cuadro 4).

Los porcentajes de extractivos solubles en agua caliente en *C. lusitanica* no presentaron evidencias estadísticas en las diferentes condiciones de torrefacción y el testigo. Para *D. panamensis* la torrefacción disminuyó el contenido de extraíbles en agua caliente, siendo la torrefacción a 250°C y a 10 y 12 minutos las que presentaron los porcentajes más bajos. En *G. arborea*, la exposición de la biomasa ante la torrefacción ocasionó un aumento en los porcentajes de extractivos. En la biomasa de *T. grandis* la torrefacción aumentó el contenido de extractivos solubles en agua caliente, siendo la torrefacción a 200°C a 8 minutos y la de 225°C a 8 minutos las que obtuvieron los mayores valores. En la biomasa de *V. ferruginea* la torrefacción disminuyó el contenido de extractivos en agua caliente, presentado los valores más bajos la torrefacción a 200°C en todos los tiempos y la de 225°C a 10 minutos (Cuadro 4).

**Cuadro 3.** Porcentaje de celulosa y lignina para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	<i>Cupressus lusitanica</i>		<i>Dipteryx panamensis</i>		<i>Gmelina arborea</i>		<i>Tectona grandis</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
		Celulosa (%)	Lignina (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)
200	Testigo	64,71 <sup>A</sup> (2,04)	31,39 <sup>A</sup> (0,77)	49,85 <sup>A</sup> (2,09)	20,26 <sup>A</sup> (4,49)	55,59 <sup>A</sup> (0,78)	23,98 <sup>A</sup> (5,65)	54,40 <sup>A</sup> (7,39)	22,10 <sup>A</sup> (6,36)	50,94 <sup>A</sup> (1,70)	12,63 <sup>A</sup> (12,82)
	8	59,21 <sup>A</sup> (10,28)	29,92 <sup>A</sup> (0,95)	54,61 <sup>A</sup> (2,65)	24,44 <sup>A</sup> (6,31)	62,47 <sup>A</sup> (10,22)	18,36 <sup>B</sup> (3,33)	49,76 <sup>A</sup> (1,40)	34,88 <sup>B</sup> (1,97)	49,90 <sup>A</sup> (3,11)	13,76 <sup>A</sup> (13,23)
	10	55,79 <sup>A</sup> (2,47)	30,70 <sup>A</sup> (0,79)	50,11 <sup>A</sup> (5,25)	22,35 <sup>A</sup> (1,49)	52,31 <sup>A</sup> (6,77)	21,24 <sup>B</sup> (1,86)	55,84 <sup>A</sup> (3,27)	34,51 <sup>B</sup> (0,85)	49,40 <sup>A</sup> (2,69)	17,63 <sup>B</sup> (0,94)
	12	54,72 <sup>B</sup> (4,40)	29,62 <sup>A</sup> (1,86)	53,52 <sup>A</sup> (1,73)	22,31 <sup>A</sup> (12,95)	54,30 <sup>A</sup> (3,23)	22,65 <sup>B</sup> (7,50)	58,02 <sup>A</sup> (0,83)	34,33 <sup>B</sup> (2,98)	52,32 <sup>A</sup> (1,92)	21,58 <sup>C</sup> (1,33)
225	8	59,03 <sup>A</sup> (10,45)	28,95 <sup>A</sup> (3,10)	55,24 <sup>A</sup> (7,38)	26,07 <sup>A</sup> (30,85)	59,40 <sup>A</sup> (6,11)	21,84 <sup>B</sup> (6,23)	60,54 <sup>A</sup> (7,06)	33,34 <sup>B</sup> (6,22)	51,45 <sup>A</sup> (1,48)	22,08 <sup>C</sup> (3,83)
	10	54,08 <sup>B</sup> (2,25)	27,33 <sup>B</sup> (1,08)	47,83 <sup>A</sup> (3,23)	23,97 <sup>A</sup> (1,88)	56,10 <sup>A</sup> (4,42)	27,01 <sup>C</sup> (4,08)	58,91 <sup>A</sup> (8,46)	29,28 <sup>C</sup> (1,95)	66,00 <sup>B</sup> (11,44)	18,71 <sup>C</sup> (2,84)
	12	57,69 <sup>A</sup> (2,06)	32,30 <sup>A</sup> (5,62)	47,58 <sup>A</sup> (5,04)	26,26 <sup>A</sup> (7,24)	56,10 <sup>A</sup> (1,37)	25,88 <sup>C</sup> (2,33)	56,10 <sup>A</sup> (1,37)	28,18 <sup>C</sup> (3,07)	65,82 <sup>C</sup> (9,28)	19,98 <sup>C</sup> (5,12)
250	8	56,91 <sup>A</sup> (2,97)	34,45 <sup>A</sup> (3,77)	59,28 <sup>B</sup> (1,80)	31,40 <sup>B</sup> (5,27)	57,65 <sup>A</sup> (3,48)	27,34 <sup>C</sup> (2,18)	56,42 <sup>A</sup> (5,17)	29,53 <sup>C</sup> (0,79)	52,58 <sup>A</sup> (0,20)	20,31 <sup>C</sup> (1,65)
	10	63,91 <sup>A</sup> (4,03)	35,09 <sup>C</sup> (4,77)	59,69 <sup>B</sup> (5,92)	31,77 <sup>B</sup> (2,71)	67,57 <sup>B</sup> (1,93)	37,72 <sup>D</sup> (1,27)	57,93 <sup>A</sup> (14,03)	33,81 <sup>B</sup> (0,86)	66,00 <sup>B</sup> (11,44)	22,96 <sup>C</sup> (3,13)
	12	63,22 <sup>A</sup> (2,77)	41,09 <sup>D</sup> (5,27)	65,37 <sup>B</sup> (0,23)	35,06 <sup>B</sup> (16,22)	51,21 <sup>A</sup> (2,12)	25,32 <sup>C</sup> (4,41)	68,71 <sup>B</sup> (1,99)	45,52 <sup>D</sup> (1,95)	63,22 <sup>A</sup> (13,18)	41,09 <sup>D</sup> (0,82)

Nota: letra al lado del número representa nivel de significancia estadística a 95% entre torrefacciones, número entre paréntesis los coeficientes de variación.

**Cuadro 4.** Porcentaje de extractivos en etanol-tolueno, agua fría y agua caliente para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	<i>Cupressus lusitanica</i>			<i>Dipteryx panamensis</i>			<i>Gmelina arborea</i>			<i>Tectona grandis</i>			<i>Vochysia ferruginea</i>		
		E-to	Agua Fría	Agua Caliente	E-to	Agua Fría	Agua Caliente	E-to	Agua Fría	Agua Caliente	E-to	Agua Fría	Agua Caliente	E-to	Agua Fría	Agua Caliente
200	Testigo	2,21 <sup>A</sup> (45,27)	4,29 <sup>A</sup> (25,03)	8,01 <sup>A</sup> (16,99)	11,20 <sup>A</sup> (3,64)	11,87 <sup>A</sup> (37,24)	11,38 <sup>D</sup> (20,38)	0,82 <sup>A</sup> (42,68)	9,04 <sup>A</sup> (1,49)	7,81 <sup>A</sup> (0,97)	1,18 <sup>A</sup> (0,00)	8,51 <sup>A</sup> (5,09)	7,22 <sup>A</sup> (1,26)	15,20 <sup>A</sup> (1,50)	16,86 <sup>A</sup> (2,72)	17,88 <sup>A</sup> (2,14)
	8	10,24 <sup>B</sup> (3,71)	8,54 <sup>B</sup> (4,78)	7,75 <sup>A</sup> (2,23)	9,89 <sup>A</sup> (1,92)	3,70 <sup>B</sup> (12,33)	9,38 <sup>C</sup> (7,09)	10,14 <sup>B</sup> (1,97)	6,39 <sup>B</sup> (4,14)	10,77 <sup>B</sup> (1,91)	8,31 <sup>B</sup> (3,71)	9,05 <sup>A</sup> (6,76)	11,01 <sup>B</sup> (1,92)	10,42 <sup>B</sup> (0,66)	11,59 <sup>B</sup> (9,28)	9,41 <sup>B</sup> (0,67)
	10	9,83 <sup>B</sup> (13,10)	7,76 <sup>C</sup> (0,75)	7,01 <sup>A</sup> (2,10)	8,93 <sup>B</sup> (2,66)	7,61 <sup>C</sup> (0,45)	8,42 <sup>B</sup> (3,35)	9,89 <sup>B</sup> (1,09)	9,50 <sup>A</sup> (1,02)	10,65 <sup>B</sup> (2,40)	9,21 <sup>B</sup> (0,69)	8,46 <sup>A</sup> (2,63)	10,80 <sup>B</sup> (2,70)	11,77 <sup>A</sup> (1,69)	10,48 <sup>B</sup> (3,81)	9,74 <sup>B</sup> (2,96)
	12	10,52 <sup>B</sup> (2,38)	7,94 <sup>C</sup> (2,56)	8,17 <sup>A</sup> (4,11)	6,24 <sup>C</sup> (7,83)	7,61 <sup>BC</sup> (2,65)	9,25 <sup>C</sup> (1,32)	7,23 <sup>C</sup> (5,31)	7,87 <sup>A</sup> (0,86)	11,11 <sup>B</sup> (1,85)	9,09 <sup>B</sup> (8,99)	8,25 <sup>A</sup> (5,23)	10,72 <sup>B</sup> (1,73)	10,90 <sup>B</sup> (0,99)	10,32 <sup>B</sup> (4,14)	9,91 <sup>B</sup> (2,22)
225	8	10,70 <sup>B</sup> (1,80)	7,45 <sup>C</sup> (6,19)	8,05 <sup>A</sup> (3,46)	6,98 <sup>C</sup> (4,30)	7,37 <sup>A</sup> (2,24)	10,97 <sup>C</sup> (2,35)	8,79 <sup>BC</sup> (22,81)	7,44 <sup>A</sup> (4,72)	9,94 <sup>C</sup> (0,77)	9,08 <sup>B</sup> (1,37)	8,78 <sup>A</sup> (2,85)	11,31 <sup>B</sup> (4,56)	12,86 <sup>A</sup> (28,51)	10,48 <sup>B</sup> (2,87)	10,02 <sup>B</sup> (1,88) <sup>B</sup>
	10	9,31 <sup>B</sup> (17,95)	7,17 <sup>C</sup> (1,96)	7,78 <sup>A</sup> (2,27)	6,52 <sup>C</sup> (6,19)	6,61 <sup>D</sup> (10,37)	10,39 <sup>C</sup> (2,36)	7,37 <sup>C</sup> (4,34)	7,80 <sup>A</sup> (18,20)	9,81 <sup>C</sup> (4,36)	8,14 <sup>B</sup> (6,31)	6,71 <sup>A</sup> (7,03)	10,24 <sup>B</sup> (0,81)	10,80 <sup>B</sup> (6,28)	11,37 <sup>B</sup> (10,58)	9,88 <sup>B</sup> (2,11)
	12	8,51 <sup>B</sup> (15,29)	7,01 <sup>C</sup> (3,78)	7,94 <sup>A</sup> (6,84)	8,76 <sup>D</sup> (8,11)	6,89 <sup>D</sup> (3,89)	9,72 <sup>C</sup> (1,86)	8,94 <sup>BC</sup> (8,78)	5,56 <sup>B</sup> (3,16)	9,11 <sup>C</sup> (1,31)	8,94 <sup>B</sup> (8,78)	5,56 <sup>B</sup> (3,16)	9,11 <sup>B</sup> (1,31)	12,19 <sup>A</sup> (20,40)	9,91 <sup>B</sup> (0,78)	15,37 <sup>C</sup> (0,84)
250	8	7,88 <sup>B</sup> (2,14)	6,95 <sup>C</sup> (3,48)	8,94 <sup>A</sup> (3,70)	8,60 <sup>D</sup> (15,95)	5,39 <sup>E</sup> (9,15)	6,22 <sup>A</sup> (1,15)	9,92 <sup>B</sup> (1,61)	7,96 <sup>A</sup> (7,68)	10,25 <sup>B</sup> (2,86)	9,80 <sup>C</sup> (1,98)	6,80 <sup>A</sup> (3,67)	9,85 <sup>B</sup> (1,21)	11,53 <sup>A</sup> (6,90)	11,12 <sup>B</sup> (4,98)	14,46 <sup>C</sup> (5,22)
	10	7,73 <sup>B</sup> (10,38)	6,92 <sup>C</sup> (6,14)	8,21 <sup>A</sup> (3,67)	10,14 <sup>A</sup> (7,60)	5,81 <sup>E</sup> (4,15)	5,77 <sup>A</sup> (9,22)	11,41 <sup>B</sup> (1,43)	6,72 <sup>B</sup> (5,23)	8,33 <sup>A</sup> (4,93)	9,55 <sup>C</sup> (1,03)	6,22 <sup>B</sup> (3,72)	8,81 <sup>B</sup> (7,05)	11,02 <sup>A</sup> (2,95)	10,64 <sup>B</sup> (3,71)	15,05 <sup>C</sup> (1,56)
	12	6,33 <sup>B</sup> (10,94)	5,99 <sup>C</sup> (4,38)	7,45 <sup>A</sup> (6,55)	8,37 <sup>D</sup> (3,05)	4,43 <sup>E</sup> (10,35)	5,01 <sup>A</sup> (2,09)	10,96 <sup>B</sup> (3,70)	6,95 <sup>B</sup> (14,33)	9,71 <sup>C</sup> (8,50)	9,31 <sup>C</sup> (3,51)	7,77 <sup>A</sup> (14,20)	8,82 <sup>B</sup> (11,79)	6,33 <sup>B</sup> (7,61)	5,99 <sup>B</sup> (11,33)	7,45 <sup>D</sup> (5,00)

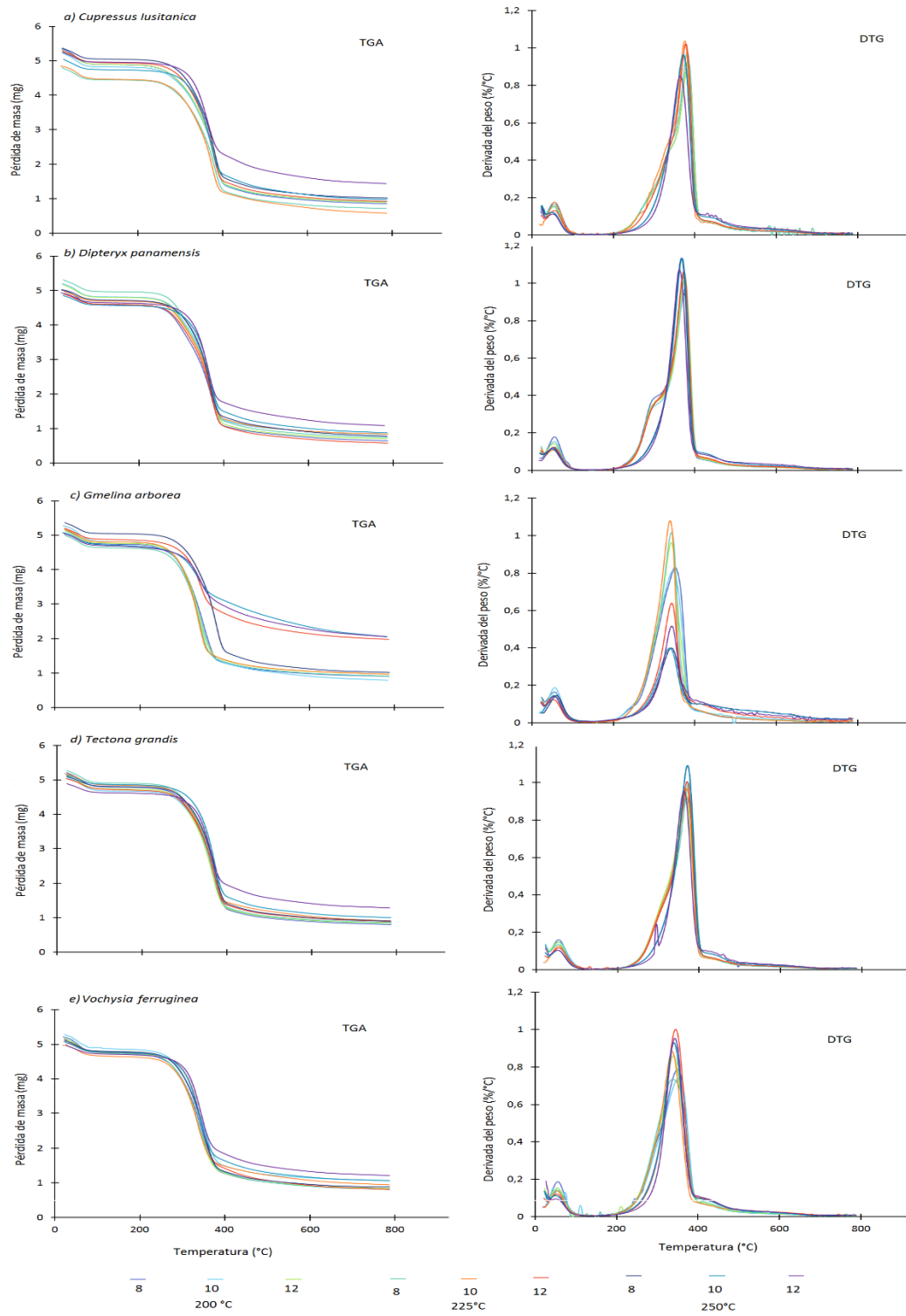
Nota: letra al lado del número representa nivel de significancia estadística a 95% entre torrefacciones, número entre paréntesis los coeficientes de variación.

### Análisis Termogravimétrico TGA

El comportamiento de descomposición térmico observado para las cinco especies en el TGA y DTG presenta el mismo patrón (Figura 4 a-e), pero se observan mayores diferencias en la descomposición de las especies a través de la curva de DTG. En el caso de la curva de DTG se presentan cuatro importantes etapas: la primera aparece una señal antes de los 100 °C y se extiende a los 200 °C; la segunda se evidencia un pico entre los 290 °C y 330 °C con una leve señal; la tercera ocurre entre los 340 °C y los 380 °C y la cuarta se presenta entre los 400 °C y los 500 °C, donde la rapidez en la pérdida de masa es más baja con respecto a las otras dos descomposiciones. En el caso de *C. lusitanica* (Figura 4a), en la curva de TGA la torrefacción a 250°C y 12 minutos es la que evidenció una menor degradación de masa, en el DTG la torrefacción a 250 °C no presentó la señal entre 290 °C y 330°C. En *D. panamensis* (Figura 4b), en la curva de TGA la torrefacción a 250°C a 12 minutos es la que presenta la menor degradación de masa con la temperatura, en la curva de DTG se observa que la torrefacción a 250°C a 10 y 12 minutos no se evidencia la señal entre 290°C y 330°C. En *G. arborea* (Figura 4c), las biomásas que presentan una menor pérdida de masa ante la temperatura son las torrefacciones a 250°C a 10 y 12 minutos y a 225°C a 12 minutos; en la curva DTG se observa que la señal entre 290°C y 330°C para todas las torrefacciones desapareció, y para las torrefacciones de 250°C la señal entre 340°C y 380°C fue menor que en la torrefacción a 225°C y 200°C. En *T. grandis* (Figura 4d), la torrefacción a 250°C y 12 minutos fue la que presentó una degradación térmica de la masa menor, en el DTG la torrefacción a 250°C a 10 y 12 minutos no evidenciaron la señal a 290°C y 330°C. En *V. ferruginea* (Figura 4e) se presenta la misma situación de las demás especies donde la torrefacción a 250°C a 12 minutos es la que evidencia una pérdida de masa menor en el TGA y en cuanto al DTG ninguna de las torrefacciones presentó la señal entre 290°C y 330°C.

En la Cuadro 5 muestra los parámetros cinéticos de la descomposición de hemicelulosa y celulosa en la biomasa torrefaccionado ocurrida en TGA. La biomasa torrefactada a bajas temperaturas 200°C y 225°C de *C. lusitanica* se presentó mayor energía de activación para la descomposición de hemicelulosa, sin embargo, a una torrefacción de 250°C a 10 y 12 minutos la energía de activación fue más baja. En el caso de celulosa en la

biomasa de *C. lusitanica* cuando se aumenta la temperatura y tiempo de torrefacción la energía aumenta, requiriendo más energía para degradar la celulosa en la biomasa. En la biomasa de *D. panamensis* la torrefacción disminuyó la energía requerida ( $E_a$ ) para descomponer la hemicelulosa de la biomasa, y en el caso de la celulosa la energía de activación aumenta con el aumento de la temperatura y tiempo de torrefacción. En la biomasa torrefactada a 200°C y 225°C de *G. arborea*, se tiene altos valores de energía de activación para hemicelulosa, pero la torrefacción a 250°C la energía de activación disminuye significativamente. En el caso de la celulosa, la energía activación aumenta con el aumento de la temperatura de torrefacción. En *T. grandis* la energía de activación aumenta hasta la torrefacción de 225°C a 12 minutos en hemicelulosa, luego de esta se presenta una disminución de la energía de activación en la biomasa torrefactada a 250 °C, en tanto que celulosa ocurre una disminución de la energía de activación en la biomasa torrefacciona a 225 °C a 8 y 10 minutos y en la de 250°C a 8 minutos. En las demás temperaturas, la energía activación aumentó con la temperatura de torrefacción. En *V. ferruginea* la energía de activación en hemicelulosa disminuye en la torrefacción de 200°C, 225°C y 250°C en el tiempo de 12 minutos, para la última ocurre también a los 10 minutos. En las demás condiciones de torrefacción se da un aumento en las energías activación. En el caso de celulosa de la biomasa de esta especie se da un aumentó con la torrefacción con la temperatura, excepto a 200°C a 10 minutos y 225°C a 8 minutos, donde se observa un valor bajo de energía de activación. Es importante mencionar que, los coeficientes de correlación para todas las condiciones de torrefacción se mantuvieron próximo a 0,99, excepto en los modelos de celulosa para *G. arborea* que fueron bajos.



**Figura 4.** Descomposición termo gravimétrica por pérdida de masa y derivada del peso (%/°C) para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

**Cuadro 5.** Resumen de la energía de activación y el factor de pre exponencial para hemicelulosa y celulosa para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

Especie	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Hemicelulosa			Celulosa		
			A <sup>a</sup>	Ea <sup>b</sup>	R <sup>2c</sup>	A <sup>a</sup>	Ea <sup>b</sup>	R <sup>2c</sup>
<i>Cupressus lusitanica</i>	200	8	3x10 <sup>+09</sup>	78,54	0,995	8 x10 <sup>+07</sup>	68,15	0,999
		10	4 x10 <sup>+09</sup>	79,83	0,993	9 x10 <sup>+07</sup>	68,50	0,999
		12	5 x10 <sup>+09</sup>	80,77	0,994	5 x10 <sup>+07</sup>	65,69	0,999
	225	8	2 x10 <sup>+10</sup>	87,00	0,996	1 x10 <sup>+09</sup>	81,41	0,999
		10	1 x10 <sup>+10</sup>	85,10	0,996	3 x10 <sup>+17</sup>	177,72	0,997
		12	6 x10 <sup>+09</sup>	84,31	0,998	9 x10 <sup>+15</sup>	160,32	0,999
	250	8	3 x10 <sup>+09</sup>	82,06	0,999	1 x10 <sup>+16</sup>	161,09	0,998
		10	5 x10 <sup>+08</sup>	76,01	0,998	2 x10 <sup>+25</sup>	267,63	0,973
		12	6 x10 <sup>+07</sup>	68,20	0,996	6 x10 <sup>+19</sup>	201,13	0,999
<i>Dipteryx panamensis</i>	200	8	2 x10 <sup>+12</sup>	105,09	0,997	1 x10 <sup>+12</sup>	113,37	0,997
		10	4 x10 <sup>+13</sup>	118,22	0,997	3 x10 <sup>+12</sup>	119,10	0,997
		12	3 x10 <sup>+13</sup>	117,56	0,997	6 x10 <sup>+13</sup>	133,84	0,997
	225	8	1 x10 <sup>+14</sup>	124,52	0,998	7 x10 <sup>+15</sup>	157,13	0,994
		10	1 x10 <sup>+14</sup>	123,11	0,998	1 x10 <sup>+19</sup>	193,39	0,985
		12	1 x10 <sup>+13</sup>	113,55	0,998	4 x10 <sup>+16</sup>	164,91	0,991
	250	8	3 x10 <sup>+10</sup>	89,74	0,999	6 x10 <sup>+18</sup>	189,23	0,989
		10	4 x10 <sup>+08</sup>	74,99	0,999	9 x10 <sup>+21</sup>	227,38	0,982
		12	2 x10 <sup>+07</sup>	63,50	0,998	2 x10 <sup>+28</sup>	299,93	0,946
<i>Gmelina arborea</i>	200	8	7 x10 <sup>+08</sup>	72,31	0,989	2 x10 <sup>+09</sup>	77,58	0,993
		10	8 x10 <sup>+09</sup>	81,78	0,994	2 x10 <sup>+11</sup>	96,76	0,986
		12	1 x10 <sup>+11</sup>	94,09	0,999	4 x10 <sup>+22</sup>	223,14	0,899
	225	8	3 x10 <sup>+10</sup>	89,13	1,000	4 x10 <sup>+24</sup>	244,67	0,810
		10	4 x10 <sup>+10</sup>	90,18	0,999	2 x10 <sup>+32</sup>	327,91	0,729
		12	6 x10 <sup>+06</sup>	56,71	0,997	2 x10 <sup>+29</sup>	298,74	0,760
	250	8	3 x10 <sup>+08</sup>	73,15	0,997	1 x10 <sup>+16</sup>	161,09	0,998
		10	2 x10 <sup>+03</sup>	26,64	0,999	6 x10 <sup>+30</sup>	307,73	0,751
		12	9 x10 <sup>+02</sup>	24,51	0,998	5 x10 <sup>+27</sup>	280,18	0,856
<i>Tectona grandis</i>	200	8	4 x10 <sup>+11</sup>	100,73	1,000	9 x10 <sup>+14</sup>	144,88	0,994
		10	3 x10 <sup>+11</sup>	100,10	1,000	6 x10 <sup>+16</sup>	167,35	0,990
		12	1 x10 <sup>+12</sup>	105,50	1,000	5 x10 <sup>+19</sup>	198,64	0,971
	225	8	3 x10 <sup>+12</sup>	109,36	0,999	4 x10 <sup>+12</sup>	118,89	0,996
		10	2 x10 <sup>+12</sup>	107,99	0,999	7 x10 <sup>+12</sup>	121,37	0,994
		12	2 x10 <sup>+12</sup>	108,55	0,999	4 x10 <sup>+15</sup>	153,00	0,993
	250	8	4 x10 <sup>+11</sup>	101,83	0,999	4 x10 <sup>+13</sup>	130,32	0,998
		10	4 x10 <sup>+08</sup>	75,58	0,999	7 x10 <sup>+16</sup>	168,65	0,997
		12	9 x10 <sup>+08</sup>	79,99	0,949	9 x10 <sup>+28</sup>	306,93	0,935
<i>Vochysia ferruginea</i>	200	8	6 x10 <sup>+08</sup>	71,85	0,996	7 x10 <sup>+11</sup>	104,78	1,000
		10	6 x10 <sup>+09</sup>	81,67	0,999	2 x10 <sup>+09</sup>	78,04	0,999
		12	4 x10 <sup>+08</sup>	69,73	0,971	4 x10 <sup>+24</sup>	244,37	0,996
	225	8	4 x10 <sup>+10</sup>	88,96	0,999	1 x10 <sup>+09</sup>	71,99	0,995
		10	5 x10 <sup>+09</sup>	80,92	0,999	1 x10 <sup>+30</sup>	303,55	0,985
		12	3 x10 <sup>+07</sup>	63,22	0,998	1 x10 <sup>+20</sup>	198,03	0,993
	250	8	2 x10 <sup>+11</sup>	83,23	0,997	1 x10 <sup>+13</sup>	105,55	0,990
		10	1 x10 <sup>+08</sup>	68,60	1,000	1 x10 <sup>+27</sup>	274,73	0,981

---

12	$2 \times 10^{+06}$	53,10	0,999	$1 \times 10^{+36}$	376,89	0,958
----	---------------------	-------	-------	---------------------	--------	-------

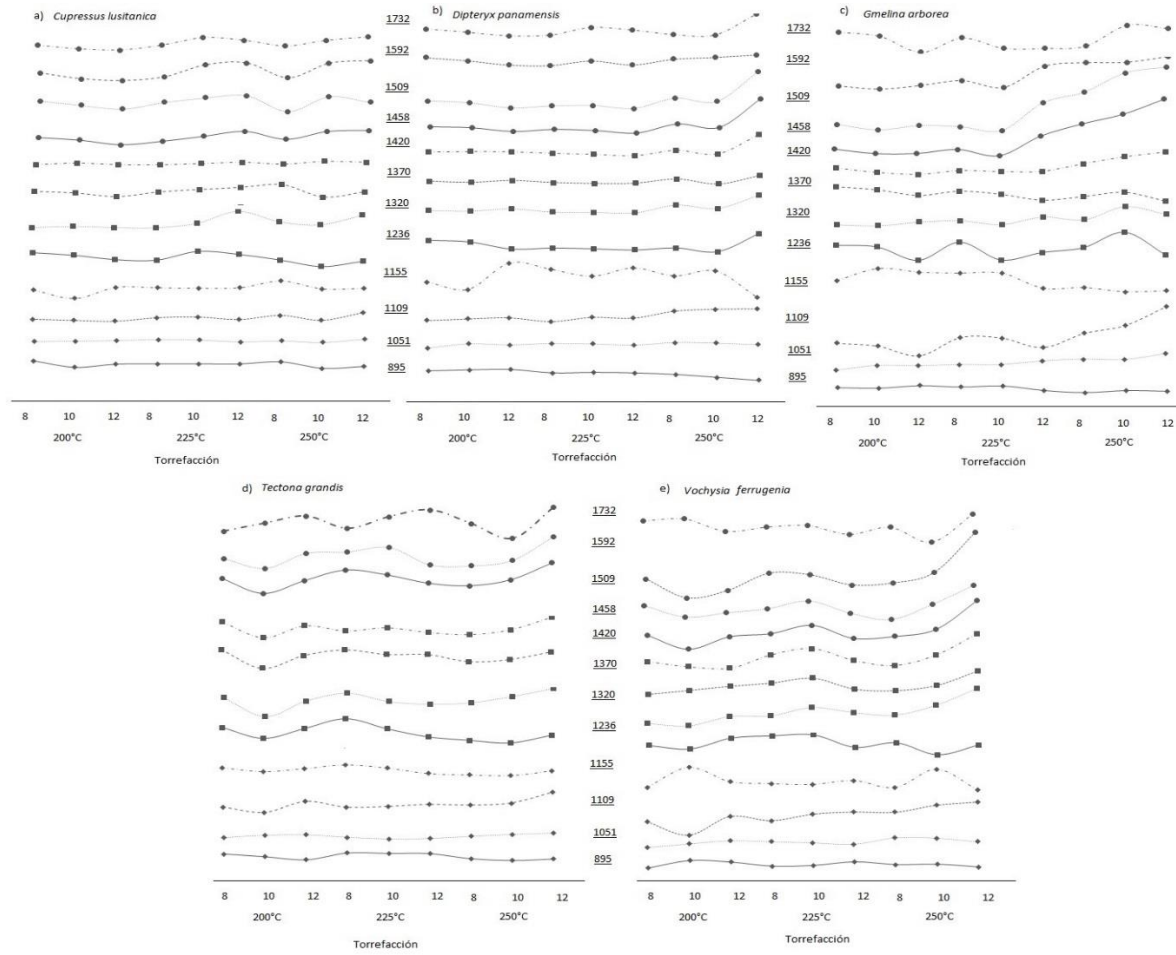
---

Nota: a factor pre exponencial, b: energía de activación (KJ mol<sup>-1</sup>), c: coeficiente de correlación

### Análisis de espectroscopia infrarrojo de transformada por Fourier IFTR

En la Figura 5, se presenta el cambio en el Radio intensidad (RI) para las bandas identificadas en el análisis infrarrojo. Se identificaron 12 bandas como las más representativas de los espectros: 895 cm<sup>-1</sup>, 1051 cm<sup>-1</sup>, 1109 cm<sup>-1</sup>, 1155 cm<sup>-1</sup>, 1236 cm<sup>-1</sup>, 1320 cm<sup>-1</sup>, 1370 cm<sup>-1</sup>, 1420 cm<sup>-1</sup>, 1458 cm<sup>-1</sup>, 1509 cm<sup>-1</sup>, 1592 cm<sup>-1</sup> y 1732 cm<sup>-1</sup>. Las IR con mayor variación se presentaron las bandas de 1109 cm<sup>-1</sup>, 1155 cm<sup>-1</sup>, 1236 cm<sup>-1</sup>, 1420 cm<sup>-1</sup> y 1458 cm<sup>-1</sup> para todas las especies evaluadas en el estudio, describiendo un cambio en la estructura de hemicelulosa, celulosa y lignina. En el caso de la especie *C. lusitánica* (Figura 5a) las bandas que presentaron mayor cambio en la RI fueron las bandas de 1155 cm<sup>-1</sup> que representan la estructura de hemicelulosa y celulosa, la de 1236 cm<sup>-1</sup>, 1320cm<sup>-1</sup> y 1420 cm<sup>-1</sup>, que están relacionadas a la lignina, observándose una variación en el IR de la biomasa cuando es torrefactada a 250°C a 10 minutos en la estructura de hemicelulosa, celulosa y lignina. Los espectros de la biomasa de *D. panamensis* (Figura 5b) la banda que presentó la mayor RI fue la de 1155 cm<sup>-1</sup>, asociada a la estructura de hemicelulosa y celulosa. Las demás señales, muestra que el IR aumenta en la biomasa torrefaccionada a 250°C en los tres tiempos. En el caso de *G. arbórea* (Figura 5c), el IR con mayor variación de IR se presentaron en la intensidad de 1109 cm<sup>-1</sup> que representa enlaces encontrados en polisacáridos y lignina, en la intensidad de 1155 cm<sup>-1</sup> y 1458 cm<sup>-1</sup> asociado a la celulosa y hemicelulosa y 1236 cm<sup>-1</sup> y 1420 cm<sup>-1</sup> asociado a la lignina, siendo la biomasa torrefactada a 250°C en los tres tiempos la que presentaron los mayores valores de IR. En la biomasa de *T. grandis* (Figura 5d) los IR más afectados fueron 1236 cm<sup>-1</sup> y 1320 cm<sup>-1</sup>, ambas asociadas a la lignina. Las demás IR de las bandas restante ocurre un aumento del IR con respecto al aumento en la temperatura y tiempo de torrefacción (Figura 5d). En el caso de *V. ferruginea* (Figura 5e) se mostró que la banda de 1155 cm<sup>-1</sup> asociado a enlaces de la estructura de hemicelulosa y celulosa fue la de

más variación del IR, mientras que en el resto de bandas seleccionadas ocurrió un aumento del IR en la torrefacción de 250°C en los tres tiempos (Figura 5e).



**Figura 5.** Cambio en la intensidad del radio ( $I_n/T_{1031}$ ) de las bandas para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales



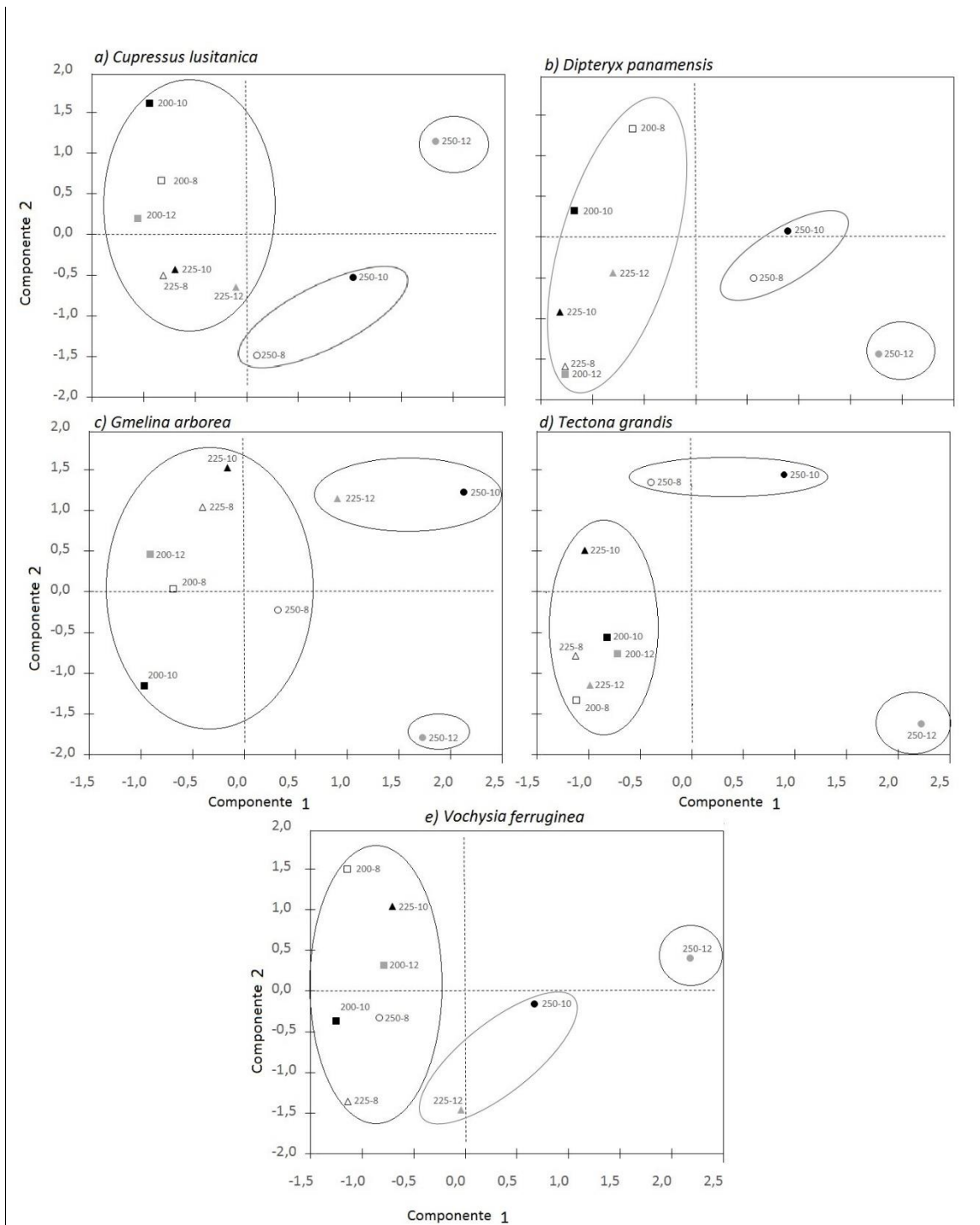
### Análisis multivariado

El efecto de cada variable estudiada en el presente estudio, se puede representar por medio del análisis multivariado por componentes, este se realizó para cada una de las especies (Figura 6). En este análisis se mostró que los dos primeros componentes representan aproximadamente el 75% de la variación total de las variables evaluadas, del cual el 60% es explicado por medio del componente 1 (Cuadro 6). En el caso de *C. lusitanica* las variables que influyen más en este valor son el contenido de lignina, el porcentaje de cenizas, extractivos en agua caliente, contenido de volátiles, la pérdida de masa y la energía de activación en celulosa. Para *D. panamensis* las variables más representativas en el componente 1 son contenido de lignina, extractivos en agua caliente, la pérdida de masa y las energías de activación tanto para hemicelulosa como para celulosa. En *G. arborea* esta representación está dada por el contenido de volátiles y la energía de activación de la hemicelulosa. En el caso de *T. grandis*, la representación del componente 1 está dada por las variables de contenido de cenizas y volátiles, la pérdida de masa y ambas energías de activación (hemicelulosa y celulosa). En la especie *V. ferruginea* las variables más representativas del comportamiento de la biomasa ante la torrefacción fueron el contenido de cenizas y volátiles, el poder calórico, la pérdida de masa y la energía de activación para hemicelulosa y celulosa.

El 15% restante de la representación está dada por el componente 2 el cual es representando en *C. lusitanica* por los extractivos en agua caliente. En *D. panamensis* este porcentaje está dado por los extractivos en etanol- tolueno. En el caso de *G. arborea*, para el componente 2 la variable as representativa fue el contenido de celulosa. Para *T. grandis* esta representatividad estuvo dada por medio de los extractivos en agua caliente. Y para *V. ferruginea* este porcentaje de representación lo brindo la variable de extractivos en etanol – tolueno.

Al graficar los autovectores para el componente 1 y 2 para cada especie (Figura 6), fue posible de identificar tres diferentes agrupamientos en las temperaturas y tiempos de torrefacción de la biomasa. Un primer grupo las biomazas torrefactada s a 200°C a 8, 10 y 12 minutos y a 225°C a 8 y 10 minutos. Un segundo grupo se observa en las biomazas torrefactada s a 225°C a 12 minutos y la de 250°C a 8 y 10 minutos. Finalmente, el tercer

grupo es formado por la biomasa torrefactada a 250°C y 12 minutos, la cual tuvo un comportamiento completamente diferente a todas las demás biomásas torrefacionadas, aislándose por completo de las demás temperaturas y tiempos de torrefacción (Figura 6).



**Figura 6.** Relación entre el auto vector del factor 1 y 2 del análisis multivariado por medio de componentes principales para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

**Cuadro 6.** Matriz de correlaciones del análisis multivariado para todas las variables evaluadas para biomasa torrefactada a diferentes temperaturas y tiempos de cinco especies forestales.

Variable	<i>Cupressus lusitanica</i>		<i>Dipteryx panamensis</i>		<i>Gmelina arborea</i>		<i>Tectona grandis</i>		<i>Vochysia ferruginea</i>	
	C1*	C2**	C1*	C2**	C1*	C2**	C1*	C2**	C1*	C2**
Celulosa	0,813	0,092	0,874	-0,166	0,286	<b>0,568</b>	0,738	-0,084	0,382	-0,116
Lignina	<b>0,933</b>	0,129	<b>0,955</b>	-0,152	0,789	0,351	0,771	-0,486	0,836	-0,276
Extractivos Agua Caliente	0,042	<b>-0,898</b>	<b>-0,933</b>	-0,063	-0,861	-0,391	-0,883	-0,374	0,640	-0,424
Extractivos Etanol+Tolueno	<b>-0,938</b>	0,097	0,496	<b>0,807</b>	0,622	-0,469	0,496	0,441	-0,446	<b>-0,873</b>
Cenizas	<b>0,942</b>	0,244	-0,225	-0,713	0,862	-0,416	<b>0,917</b>	-0,175	<b>0,944</b>	0,170
Volátiles	<b>-0,981</b>	-0,094	-0,843	-0,171	<b>-0,941</b>	0,093	<b>-0,931</b>	0,075	<b>-0,961</b>	0,034
Poder Calórico	0,813	-0,381	0,625	-0,462	0,882	0,063	0,394	0,019	0,817	-0,082
Extractivos Agua Fría	-0,843	0,189	-0,658	-0,444	-0,532	-0,365	-0,416	<b>-0,855</b>	-0,495	0,676
Pérdida masa	<b>0,984</b>	-0,037	<b>0,920</b>	-0,232	0,880	-0,390	<b>0,990</b>	-0,043	0,982	0,032
Ea Hemicelulosa	-0,763	-0,536	<b>-0,990</b>	-0,061	<b>-0,924</b>	0,272	-0,887	-0,193	-0,811	-0,174
Ea Celulosa	0,811	-0,361	0,828	-0,392	0,616	0,499	0,842	-0,444	0,802	0,320
Porcentaje de varianza	71,3	13,7	62,7	17,0	59,4	14,7	60,7	14,4	58,6	15,1
Varianza acumulada	71,3	85,0	62,7	79,6	59,4	74,0	60,7	75,1	58,6	73,7

Nota: \* C1: correlaciones de componente 1; \*\* C2: correlaciones de componente 2

## **Análisis de Resultados**

### Pérdida de masa

Los porcentajes de pérdida de biomasa en la torrefacción encontrados en el estudio entre 10% y 50% son aceptables ya que para asegurar la economía del proceso la biomasa no debe perder más del 50% de masa (Wannapeere et al., 2011). Estos porcentajes concuerdan con otros estudios realizado por Chen et al (2011), el cual reportó que a torrefacciones menores al 250°C se presentaron pérdida de masa menores al 50%, mientras que para la torrefacción mayor a esta temperatura se perdió más del 50% concluyendo que esas torrefacciones son inapropiadas. La misma situación se presentó en torrefacciones de biomasa en otras especies como *Ficus benjamina*, donde a torrefacciones superiores a los 250°C se pierde un porcentaje de más del 50% de masa (Chen et al., 2010).

Por otro lado, como era de esperarse hubo una pérdida de masa después de la torrefacción del material en todas las especies (Figura 2), esto porque la biomasa empieza a decrecer al alcanzar temperatura de 120°C, donde primero se evapora el agua y luego de está temperatura hasta aproximadamente 225 °C sigue la disminución de masa por la descomposición de hemicelulosa, volátiles y algunos ácidos orgánicos (Almeida et al., 2010, Wannapeere et al., 2011), los cuales se descomponen a mayor temperatura y mayor tiempo de torrefacción (Almeida et al., 2010). Explicando esto, el mayor grado de descomposición, la mayor pérdida de masa con el aumento del tiempo de torrefacción en el presente estudio (Figura 2).

Luego al aumentar la temperatura sobre 225 °C empieza la degradación de la celulosa y lignina (Wannapeere et al., 2011, Sabil et al., 2013), los cuales son los principales componentes de biomasa maderables (Tenorio et al., 2016). Estos dos últimos componentes de la biomasa maderables, empiezan su degradación a temperaturas mayores a 225 °C (Rousset, 2011, Wannapeere et al., 2011, Sabil et al., 2013), por lo que explica la mayor pérdida de biomasa en relación a las temperaturas de 200 °C y 225 °C (Figura 2).

Cada una de las especies estudiadas presentó diferentes porcentajes de pérdida de masa ante la torrefacción (Figura 2). Esto está relacionado a las características propias de cada especie y presenta diferentes volatilizaciones con la temperatura (Moya et al., 2017).

Cada una de las biomásas presenta pérdidas que están relacionadas (Moya et al., 2017; Wannapeere et al., 2011), y cada especie tiene una composición química y estructural única (Schroeder, 2007; Pazos & Sotelo, 1999), obteniendo un comportamiento único en cada una de ellas.

### Propiedades energéticas

El contenido de cenizas varió de una especie a otra, tanto en la biomasa sin torrefacción como en la biomasa torrefactada (Tabla 2). Este comportamiento es normal ya que según otros estudios los contenidos de cenizas han mostrado la variación de estos parámetros entre especies, edad de los árboles, sección del árbol, el tipo de suelo y el clima (Moya et al., 2015; Tenorio et al., 2016). En las torrefacciones de 250°C el contenido de cenizas aumentó para todas las especies, situación que es desfavorable para el material, ya que altos contenidos de cenizas se atribuyen a porcentajes altos de minerales presentes en la madera y una disminución en la eficiencia energética de la biomasa (Demeyer et al., 2001, Tenorio y Moya, 2013, Casal et al., 2010).

El aumento en cenizas a los 250°C de torrefacción se ha presentado en otros estudios, donde han encontrado que a temperaturas superiores a los 250°C los contenidos de cenizas empiezan a incrementarse (Chen et al., 2015; Chen et al., 2014), esto por la pérdida de masa en el material y la permanencia de los minerales, provocando que la relación biomasa cenizas sea mayor. En relación a los rangos obtenidos, la cantidad de cenizas varió de 0,08 a 1,81 % en las torrefacciones a 200°C y 225°C (Cuadro 2), lo cual está dentro del rango de variación reportado por Casal et al., (2010) que es de 0,5% a 2%. No obstante, la biomasa de *C. lusitanica*, *G. arborea* y *V. ferruginea* en el termotratamiento de 250°C a 10 y 12 minutos (Tabla 2), presentaron valores más alto que los estudios realizados por Casal et al. (2010).

El contenido de volátiles en la biomasa maderable torrefactada está relacionado a la cantidad de agua, gases condensables y gases no condensables, tales como ácido acético, ácido fórmico, metanol, dióxido de carbono y monóxido de carbono (Granados et al., 2016). El porcentaje de volátiles en la biomasa varía entre 48% y 86% (Vassilev et al., 2010), por lo que los porcentajes obtenidos en el presente estudio (Tabla 2), se ubican dentro de ese rango y por lo son aceptables. Otro aspecto importante de mencionar es que el contenido de volátiles se redujo en la torrefacción de 250°C, situación que es explicada porque en esta

temperatura una cantidad de volátiles procedentes de la descomposición de los componentes del material como hemicelulosa, celulosa y lignina se ha dado en el momento de torrefaccionar la biomasa y ya cuando hay combustión del material quedan pocos porcentajes de estos materiales (Demirbas, 2004). Esto también se ve reflejado en el comportamiento del material ante el tiempo de exposición a la torrefacción, donde a mayor tiempo de exposición el contenido de volátiles disminuye (Tabla 2). Esto porque entre más se exponga el material a la torrefacción se da una degradación mayor de los componentes de la biomasa como la celulosa producto de la fracción de carbohidratos degradados durante el tratamiento térmico (Park et al., 2013; Matali et al., 2016), que se afectados directamente por el tiempo.

En el poder calórico radica una importante parte de la investigación, ya que en la torrefacción debe reflejar el incrementando el poder calórico por este tipo de tratamiento térmico (Keipi et al., 2014). Se estima que el poder calórico de biomasa sin torrefaccionar varía entre 19 y 21 MJ/Kg, y al tratar la biomasa con torrefacción varía entre 21 y 23 MJ/Kg (Keipi et al., 2014), lo que supone un aumento del poder calórico en aproximadamente 10%. El aumento del poder calórico ante la torrefacción se debe principalmente a la remoción de humedad, a la eliminación de volátiles, a la descomposición de hemicelulosa y a la ruptura estructural de cadenas de lignina (Matali et al., 2016; Bergman et al., 2005). Los rangos de valores del poder calórico en las diferentes especies y diferentes temperaturas de torrefacción (Figura 3) se encuentra entre 19 y 23 MJ/Kg.

En las especies estudiadas se observa que cada una obtuvieron un comportamiento diferente este ellas (Figura 3). Se observa que *G. arborea* y *T. grandis* (Figura 3 c-d) fueron las especies que presentaron valores más altos de poder calórico, esto se debe a que cada especie tiene un comportamiento particular ante la torrefacción. Cada especie presentará una degradación térmica en sus componentes diferente y al estar relacionada esta degradación con el poder calórico (Matali et al., 2016, Moya et al., 2017), es que se presentan las diferencias entre ellas. Igualmente se pudo observar que existe un aumento en el poder calórico en las torrefacciones en cada una de las temperaturas a 200°C, 225°C y 250°C a los 12 minutos, esto porque el material ha estado expuesto en un mayor tiempo a la torrefacción a este tiempo, por ende, a la degradación térmica. En estudios anteriores han demostrado que el poder calórico sigue una tendencia de aumento al aumentar la temperatura y tiempo de

torrefacción, sin embargo, a temperaturas de torrefacción de 250°C o superiores la pérdida de masa es mayor por lo que se considera como un tratamiento inadecuado para la biomasa (Chen et al., 2011).

### Propiedades químicas

En estudios realizados en biomasa sin torrefaccionar se indica que hay una diferencia entre los contenidos de celulosa y lignina entre especies latifoliadas y coníferas (Pereira et al., 2003). *C. lusitanica* es considerada una especie conífera, y la cantidad de celulosa y lignina en las especies evaluadas, pero sin biomasa torrefaccionada, difiere en los rangos de porcentajes de contenidos de celulosa y lignina en relación a las otras especies latifoliadas (Cuadro 3). Entonces al aplicar la torrefacción a la biomasa se logró evidenciar también esas diferencias en los contenidos de celulosa y lignina (Cuadro 3).

Estos cambios están relacionados con el comportamiento de la biomasa ante la torrefacción. En el presente trabajo se realizaron torrefacciones ligeras (Chen et al., 2015), en las cuales la celulosa y la lignina son degradadas ligeramente (Rousset, 2011). El comportamiento de descomposición de la biomasa ante torrefacción ligera, se da primeramente en la consumación extensa de hemicelulosa y volátiles, seguido del consumo intermedio de celulosa y por último una ligera degradación de lignina, el cual es el componente más difícil de degradar térmicamente (Chen et al., 2015). Algunos estudios señalan que los componentes principales de la biomasa empiezan a degradarse en un mayor porcentaje al alcanzar un rango de temperatura entre 250°C y 300°C (Chen et al., 2015), por esto que en el estudio se observa (Cuadro 3), que las torrefacciones de 250°C, son las que presentaron un aumento en sus contenidos de lignina y celulosa, estos aumentos están relacionados directamente con la degradación de la hemicelulosa el cual es el componente que se ve más afectado ante la torrefacción ligera, haciendo que al disminuir el contenido de hemicelulosa la proporción de celulosa y lignina en el material aumente.

El contenido de extractivos está asociado con la naturaleza química de la biomasa (Pereira et al., 2003). Los extractivos en etanol-tolueno por lo general son considerados como estructuras de polímeros en la madera, como cantidad de ceras, grasas, resinas y aceites,

además de algunos taninos (ASTM D1107-96, 2003), lo que indica que la torrefacción aumenta la cantidad de estos componentes en la biomasa para las especies de *C. lusitanica*, *G. arborea* y *T. grandis* (Cuadro 4). En el caso de los extraíbles en agua fría, la torrefacción aumento los porcentajes en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *T. grandis* (Cuadro 4), por lo que la torrefacción de la biomasa produce una mayor cantidad de taninos, gomas, azúcares y colorantes en la biomasa (ASTM D1110-84, 2003). Los extractivos solubles en agua caliente disminuyeron después de la torrefacción en las especies *C. lusitanica*, *D. panamensis* y *V. ferruginea* (Cuadro 4), observado que queda menos disponibilidad de taninos, gomas, azúcares, colorantes y almidones (ASTM D1110-84, 2003), caso contrario en *G. arborea* y *T. grandis* que el contenido aumentó evidenciando una disponibilidad de los componentes antes mencionados.

Los contenidos de extractivos encontrados en las especies estudiadas están atribuidos a la naturaleza de las especies tropicales, ya que estas especies contienen altos porcentajes de extractivos (Moya & Tenorio., 2013, Moya et al., 2017, Tenorio et al., 2016), al igual que cada una de las cinco especies estudiadas obtuvo porcentajes diferentes entre ellas (Cuadro 4). El aumento en los porcentajes de extractivos que se presentaron afectan las temperaturas de descomposición de hemicelulosa y celulosa (Shebani et al., 2008), provocando que sea requerida menos temperatura para descomponer estos componentes. Por lo que el aumento de los extractivos en las torrefacciones de 250°C (Cuadro 3), provoca que el material sea más susceptible a la degradación térmica determinando así que este no es una torrefacción adecuada para la biomasa estudiada.

#### Análisis Termogravimétrico

El comportamiento termogravimétrico de cada especie y cada condición de torrefacción fue diferente (Figura 4). En las curvas de DTG la primer señal antes de los 150°C de temperatura se debe a la eliminación de humedad en las muestra (Prins et al., 2006). La siguiente señal entre los 230°C y 330°C se debe a la degradación de hemicelulosa (Arias et al., 2008), la cual en este tipo de biomasa ya torrefaccionado es poco evidente, de hecho a altas temperaturas no se observa, esto porque en el proceso previo a la torrefacción ya se han eliminado algunas hemicelulosas (Prins et al., 2006). El siguiente pico de la curva está relacionado con la descomposición de celulosa la cual se da en un rango de 305°C a 380°C

(Prins et al., 2006). Como se observa en la Figura 4 en las curvas de DTG para las cinco especies en la torrefacción de 250°C la señal entre los 230°C y 330°C desaparecieron, esto se debe a la remoción parcial de la hemicelulosa durante la torrefacción (Bach et al., 2016). Este resultado concuerda con el llevado a cabo por Bach et al. (2016) y Ren et al. (2013) en condiciones de torrefacción superior a los 250°C.

En el análisis termogravimétrico se espera que la energía de activación incremente conforme se incrementa la temperatura de torrefacción (Doddapaneni et al., 2016). Resultado que fue encontrado en este estudio con los diferentes tipos de biomasa. En una primera etapa, este comportamiento ocurre por la temprana degradación de hemicelulosa durante el proceso de torrefacción (Chen & Kuo, 2011), dejando poca cantidad en la biomasa torrefactada. Entonces en las pruebas de TGA las hemicelulosas comienza a descomponerse a bajas temperaturas entre los 180°C y 350°C (Park et al., 2013), por lo que se requiere de energías de activación bajas (Doddapaneni et al., 2016). Es todas las especies del presente trabajo la activación para hemicelulosa disminuyeron en la biomasa torrefactada a 250°C en las cinco especies estudiadas (Cuadro 5).

En un segundo proceso, y relacionado también a la hemicelulosa, es que luego de la degradación de este componente se requiera energías mayores para seguir con la degradación de los componentes restantes, caso es el caso de la celulosa (Doddapaneni et al., 2016), la cual comienza su proceso de descomposición entre 275 °C a 350°C (Park et al., 2013). La torrefacción de la biomasa aumenta los valores de energía de activación para celulosa, esto porque el proceso térmico aumenta el orden de las regiones de celulosa (Park et al., 2013), lo que significa que el calor sea más difícil de transportar (Poletto et al., 2012) y por tanto hay una mayor estabilidad térmica de la biomasa (Doddapaneni et al., 2016). Este comportamiento se presentó en las biombras estudiadas (Cuadro 5), donde la energía de activación para celulosa aumenta conforme se aumenta la temperatura y tiempo de torrefacción, especialmente en la torrefacción a 250°C.

### Análisis de espectroscopia infrarrojo de transformada por Fourier IFTR

El análisis de espectroscopia FTIR puede indicar cambios relativos en los grupos funcionales y estructura química de la biomasa (Chen et al., 2006; Sharma et al., 2004). En el presente estudio se observa que estas bandas presentaron claras variaciones en las cinco especies estudiadas (Figura 5), indicando la torrefacción de la biomasa provoca cambios estructurales en los componentes del material. El componente más susceptible a cambios en los rangos de temperaturas estudiados (200°C, 225°C y 250°C) es la hemicelulosa por la temprana descomposición de carbohidratos (Garrote et al., 2001). Las bandas de 1732 cm<sup>-1</sup> (O-acetil-4-O-metilglucurono-xilano) y 1592 cm<sup>-1</sup> (enlaces de C=O en grupos carboxilos de ácido glucurónico en unidades de xilanos y enlaces de C-O de aromáticos en lignina) (Akerholm & Salmén, 2001), asociadas a la estructura de hemicelulosa, pero también a la lignina, mostraron alteraciones con un aumento en el radio en la biomasa torrefactada (Figura 5 a-e). Estas variaciones indican una modificación en la estructura de hemicelulosa y lignina causada por la alineación ecuatorial del hidrogeno en el átomo de C<sub>2</sub> en los residuos de glucomanano (Stevanic & Salmén, 2009).

Así mismo en el presente estudio se identificaron las bandas con mayor variación fue 1740 cm<sup>-1</sup> (Figura 5 a-e), la cual corresponde a un grupo carbonilo (Pandey & Theagarajan, 1997; Faix, 1992) y su variación ante la torrefacción se debe a la degradación de grupos de éster en hemicelulosa que es causado por la desacetilación durante el tratamiento térmico (Carrasco & Roy, 1992). Las variaciones en las bandas de 1700 cm<sup>-1</sup> y 1600 cm<sup>-1</sup> (Figura 5 a-e), corresponde a vibraciones de enlaces C=O y C=C, los cuales vienen de cetonas, aldehídos, ésteres, grupos carboxilos y estructuras aromáticas (Chen et al., 2006; Sharma et al., 2004) y el aumento en la intensidad en la biomasa torrefactada a 250°C (Figura 5 a-e) indican la degradación de carbohidratos y el incremento relativo de lignina que intensifican la absorción de C=O (1700 cm<sup>-1</sup>). El otro aumento en las bandas de 1592 cm<sup>-1</sup> y 1509 cm<sup>-1</sup> (Figura 5 a-e) se pueden asociar a la estructura de vibraciones de aromáticos y al anillo del alcohol coniferflico con enlaces C-O. Esto indica que al torrefaccionar la biomasa aumenta la fracción aromática, o lo que indicaría también que en la biomasa torrefactada se presentan mayores unidades de alcohol coniferflico condensadas (Faix, 1992), presenta en la mayor cantidad de lignina (Cuadro 3).

El aumento en las intensidades de las bandas de  $1030\text{ cm}^{-1}$  y  $1060\text{ cm}^{-1}$  (Figura 5 a-e), correspondiente a C-O-C y C-OH alifáticos en alcohol, asociados a la celulosa (Chen et al., 2006; Sharma et al., 2004), nuevamente confirma una mayor exposición de la lignina en la biomasa torrefactada (Cuadro 3). En otras bandas relacionadas a este componente de la biomasa ( $1055$ ,  $1155$ ,  $1370$  y  $1458\text{ cm}^{-1}$ ) se presentó menor variación en la biomasa torrefactada de *T. grandis* (Figura 5 d), lo cual indica poca variación de la celulosa. Esto confirma los resultados de la evaluación de la cantidad de celulosa en la biomasa de *T. grandis*, la cual se presentaron pocas diferencias entre los tratamientos de temperaturas y tiempo (Cuadro 3). Las variaciones en las bandas relacionadas a la celulosa  $1030\text{ cm}^{-1}$  y  $1060\text{ cm}^{-1}$  (Figura 5 a-e), se deben a los cambios estructurales que ocurren en la celulosa y la formación de otros componentes como alcoholes alifáticos (Li et al., 2015). Finalmente, la variación en la banda de  $1320\text{ cm}^{-1}$  (Figura 5 a-e), se relaciona con vibraciones de enlaces de C-H, indicando la formación de estructuras condensadas (Faix 1992), las cuales provocan una disminución de la cristalinidad de la celulosa (Li et al., 2015), este efecto ocurre por la deshidratación de carbohidratos durante la torrefacción (Lionetto et al., 2012) y la fragmentación de los cristales de celulosa durante la degradación termoquímica (Hill et al., 2013).

Finalmente, al realizar el análisis multivariado relacionado con todas las variables estudiadas se logra identificar que las variables más correlacionadas y que explican mejor el comportamiento de la biomasa ante la torrefacción son las propiedades químicas del material como contenido de lignina, extractivos en agua caliente, la energía de activación para hemicelulosa y celulosa y la pérdida de masa, esto en el caso del Factor 1. Las razones de esta correlación se deben a que la torrefacción produce una degradación térmica del material como se logró evidenciar en el análisis de FTIR (Figura 5), quedando esta degradación evidenciada en el comportamiento de las propiedades químicas del material. El segundo Factor del análisis multivariado muestra el efecto que tienen los extractivos en la torrefacción, ya que estos al estar impregnados a la estructura de la biomasa hacen que a la hora de la torrefacción esta tenga diferentes comportamientos ante la degradación térmica.

En análisis multivariado muestra que al graficar ambos factores las torrefacciones presentan claras agrupaciones, donde las torrefacciones de  $200^{\circ}\text{C}$  y  $225^{\circ}\text{C}$  hasta 10 minutos,

obtuvieron un comportamiento similar entre ellas. A partir de la torrefacción de 225°C a 12 minutos se evidenció otro grupo con las torrefacciones de 225°C a 12 minutos, y 250°C a 8 y 10 minutos, las cuales provocaron cambios drásticos en la composición de la biomasa, provocando una alta degradación del material en cuanto a pérdida de masa (Figura 2), aumento en el contenido de celulosa y lignina (Cuadro 2), así como una disminución de la hemicelulosa (Figura 4), reflejando una disminución en la energía de activación de la hemicelulosa y un aumento en la de celulosa (Cuadro 5). El último grupo está integrado por la torrefacción de 250°C a 12 minutos la cual se considera muy agresiva para la biomasa, ya que en todas las variables se reflejó una degradación alta de los componentes de la biomasa, perdiendo porcentajes cercanos a los 50% de masa (Figura 2), degradando así altamente los componentes básicos de la biomasa y dando como resultado un material inadecuado para la torrefacción.

Basados en los resultados descritos anteriormente, se puede decir que las mejores temperaturas y tiempos de torrefacción para las especies, ante la torrefacción son las torrefacciones de 200°C a 8, 10 y 12 minutos y las de 225°C a y 10 minutos, ya que en estas se obtiene una degradación termoquímica óptima para utilizar la biomasa como fuente para la generación de energía, sin afectar la composición química del material en grandes proporciones. Sin embargo, las especies que presentaron un mejor comportamiento y estabilidad térmica ante la torrefacción fueron *C. lusitanica* y *D. panamensis*, en las torrefacciones antes mencionadas. Seguida de estas esta *T. grandis* y *V. ferruginea* que obtuvieron menor estabilidad térmica pero en general un comportamiento bueno en torrefacciones ligeras de 200°C a 8, 10 y 12 minutos y a 225°C a 8 minutos. Y por último se tiene a *G. arborea*, que fue la especie que presentó mayor inestabilidad térmica en el material, por lo que se recomienda utilizarla en torrefacciones ligeras de 200°C a 8, 10 y 12 minutos.

## Conclusiones

La pérdida de masa en las cinco especies estudiadas varía entre 10% y 70%. Siendo las torrefacciones de 200 °C las que presentaron el menor porcentaje de pérdida de masa y la torrefacción de 250 °C a 12 minutos los porcentajes más altos en todas las especies. En las propiedades energéticas evaluadas, se obtuvo que el porcentaje cenizas en la torrefacción entre 200 °C y 225 °C fue menor que la biomasa sin torrefaccionar y en la torrefacción de 250°C este porcentaje aumenta. Los porcentajes de cenizas vario entre 0,19% y 7,00. Para el contenido de volátiles se tiene que estos varían entre 63% y 85%. El contenido de volátiles al someterse a las torrefacciones de 200 °C y 225 °C aumentan con respecto al testigo, pero en la torrefacción de 250 °C este porcentaje los estos disminuyen. En el caso del poder calórico de la biomasa torrefactada a los diferentes tiempos y temperaturas evaluados varió entre 17 MJ/kg y 23 MJ/kg. En *D. panamensis*, *G. arborea* y *V. ferruginea* presentaron los valores más altos en las torrefacciones de 225°C y 250°C.

Para las propiedades químicas, se obtuvo que para celulosa los contenidos variaron entre 49,85% y 67,57%. En *C.lusitanica* las torrefacciones de 200°C a 12 minutos y en 225°C a 12 minutos disminuyen en relación al testigo. En las especies *D. panamensis*, *Gmelina arborea*, *T.grandis* y *V. ferruginea* el contenido de celulosa aumenta en las torrefacciones de 250°C. Para el contenido de lignina se tiene que los contenidos variaron entre 27,33% y 41,09%. En los extractivos para etanol-tolueno se obtuvo que en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *T. grandis* la torrefacción aumentó los porcentajes, y en *D. panamensis* y *V. ferruginea*, estos disminuyeron con las torrefacciones. En los extractivos en agua fría se obtuvo que los porcentajes varían entre 3,70% y 16,86%, aumentando este contenido solo en *C. lusitanica*. Para los extractivos en agua caliente se obtuvo que en *D. panamensis* y *V. ferruginea* el porcentaje disminuyó con la temperatura de 12 minutos de torrefacciones, y para *G. arborea* y *T. grandis*, aumento en las torrefacciones de 200°C a 8 minutos y 225°C a 8 minutos.

En el análisis de TGA en las curvas de DTG, se identificaron cuatro inflexiones de las cuales para todas las especies en las torrefacciones a 250°C no se visualizó la segunda señal entre 290°C y 330°C que corresponde al contenido de hemicelulosa. En las energías de activación se obtuvo que la hemicelulosa es la que obtiene menores energías que la celulosa. La primera varía entre 24,51 kJ mol<sup>-1</sup> y 124,52 51 kJ mol<sup>-1</sup>, y para celulosa entre 68,15 kJ

mol<sup>-1</sup> y 376,89 kJ mol<sup>-1</sup>. *D. panamensis* fue la especie que obtuvo una mejor estabilidad térmica en la biomasa torrefactada. El análisis FTIR identificó que las bandas con mayor variación en la IR son las de 1109 cm<sup>-1</sup>, 1155 cm<sup>-1</sup>, 1236 cm<sup>-1</sup>, 1420 cm<sup>-1</sup> y 1458 cm<sup>-1</sup> en todas las especies, que representan la estructura de hemicelulosa, celulosa y lignina principalmente en las torrefacciones de 250°C, por lo que estas torrefacciones provocan degradaciones importantes en la biomasa.

El análisis multivariado mostró que los dos primeros componentes representan aproximadamente el 75% de la variación total de las variables evaluadas. Y las variables que le aportan significancia son contenido de lignina, el porcentaje de cenizas, extractivos en agua caliente, volátiles, la pérdida de masa, la energía de activación en celulosa y los extractivos (etanol-tolueno, agua fría y agua caliente), en el componente 1 y 2. El análisis de estos dos componentes mostró que las torrefacciones se agrupan en tres grupos, el primero conformado por las torrefacciones de 200°C a 8, 10 y 12 minutos, y las torrefacciones de 225°C a 8 y 10 minutos; un segundo grupo de las torrefacciones de 225°C a 12 minutos y 250°C a 8 y 10 minutos, y un último grupo en la torrefacción de 250°C a 12 minutos. Siendo estos dos últimos grupos los que mostraron mayor degradación del material ante la torrefacción en especial la de 250°C a 12 minutos, que evidenció una degradación agresiva y no oportuna para la biomasa.

Las torrefacciones de 200°C a 8, 10 y 12 minutos y la de 225°C a 8 y 10 minutos son las más óptimas para tratar la biomasa con fines energéticos. Las especies que tienen mejor comportamiento ante la torrefacción es *C. lusitanica* y *D. panamensis* por su estabilidad térmica, seguido de *T. grandis* y *V. ferruginea* y por último *G. arborea* que es la más inestable ante la torrefacción.

### **Recomendaciones**

Se recomienda utilizar las torrefacciones de 225 °C a 8, 10 y 12 minutos y 225 °C a 8 y 10 minutos, para el tratamiento térmico de la biomasa con el fin de obtener un uso eficiente de la misma para la generación de energía en las especies *C. lusitanica* y *D. panamensis*. Para *T. grandis* y *V. ferruginea* es recomendable utilizar la temperatura de

torrefacción de 200°C a 8, 10 y 12 minutos y la de 225°C a 8 minutos. Para *G. arborea* utilizar las torrefacciones ligeras de 200°C a 8, 10 y 12 minutos por su inestabilidad térmica.

Realizar pruebas de extraíbles que se liberan durante el proceso de torrefacción, ya que los que se realizaron fue en material luego de la torrefacción por lo que no se pudo identificar el tipo de extraíbles durante la torrefacción y las sustancias que se forman con la descomposición del material.

Realizar pruebas del comportamiento de la biomasa torrefactada ante la densificación o pelletización, para comprobar si tiene una buena trabajabilidad ante este proceso para la generación de energía.

Realizar un balance energético de la energía consumida durante estos procesos previos que se le aplican a la biomasa y la energía final que se obtiene por medio de la utilización de esta biomasa.

## Referencias

- Alwi, S. R. W., Klemeš, J. J., & Varbanov, P. S. (2016). Cleaner energy planning, management and technologies: Perspectives of supply-demand side and end-of-pipe management. *Journal of Cleaner Production*, 136, 1-13
- Åkerholm, M., & Salmén, L. (2001). Interactions between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopy. *Polymer*, 42(3), 963-969.
- 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), 9778-9784.
- Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel*, 95, 305-311.
- Aragón-Garita, S., Moya, R., Bond, B., Valaert, J., Tomazello-Fihlo, M. (2016). Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica. *Biomass and Bioenergy* 87: 84-95
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 169-175.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2003) D 5865-04 “Standard test method for gross calorific value of coal and coke”. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM, Vol. 04.10. 11pp.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2003). Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood, D-1107-84. Philadelphia (PA); American Society for Testing and Materials.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2003). Standard test method for water solubility of wood, D-1110-84. Philadelphia (PA); American Society for Testing and Materials.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2013) D-1102-84 “Standard test method for ash in wood”. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2pp.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2013b) D-1762-84 “Standard test method for ash in wood”. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2pp.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1107-84 Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003c.

- ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1110-84 Standard test method for water solubility of wood. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003a.
- Bach, Q. V., & Skreiberg, Ø. (2016). Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: a review and comparison with dry torrefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 665-677.
- Bach, Q. V., & Tran, K. Q. (2015). Wet Torrefaction of forest Residues—Combustion Kinetics. *Energy Procedia*, 75, 168-173.
- Bach, Q. V., Trinh, T. N., Tran, K. Q., & Thi, N. B. D. (2016). Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass torrefied in various atmospheres. *Energy Conversion and Management*.
- Bahng, M., Mukarakate, C., Robichaud, D., & Nimlos, M. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing. *Analytica Chimica Acta*, 651, 117-138. doi:10.1016/j.aca.2009.08.016
- Bergman, P. C., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., & Kiel, J. H. A. (2005). Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Energy Centre of Netherlands, Report No. ECN-C-05-013.
- Bonifazi, G., Calienno, L., Capobianco, G., Monaco, A. L., Pelosi, C., Picchio, R., & Serranti, S. (2015). Modeling color and chemical changes on normal and red heart beech wood by reflectance spectrophotometry, Fourier Transform Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging. *Polymer Degradation and Stability*, 113, 10-21.
- Brebu, M., & Vasile, C. O. R. N. E. L. I. A. (2010). Thermal degradation of lignin—a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353.
- Bridgewater, A. V. (2004). Biomass fast pyrolysis. *Thermal Science*, 8(2), 21-50.
- Calienno, L., Pelosi, C., Picchio, R., Agresti, G., Santamaria, U., Balletti, F., & Monaco, A. L. (2015). Light-induced color changes and chemical modification of treated and untreated chestnut wood surface. *Studies in Conservation*, 60(2), 131-139.
- Carrasco, F., & Roy, C. (1992). Kinetic study of dilute-acid prehydrolysis of xylan-containing biomass. *Wood Science and Technology*, 26(3), 189-208.
- Casal, M. D., Gil, M. V., Pevida, C., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2010). Influence of storage time on the quality and combustion behaviour of pine woodchips. *Energy*, 35(7), 3066-3071.
- Chacón, L. (2012). Estudio: Diagnostico de las existencias de los residuos forestales en la región Huetar Norte de Costa Rica. Informe Final: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. Minaet, Costa Rica.
- Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zeng, Z., Wang, J., & Lu, M. (2015). Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*, 159, 27-32.

- Chen, D., Zhou, J., & Zhang, Q. (2014). Effects of torrefaction on the pyrolysis behavior and bio-oil properties of rice husk by using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Energy & Fuels*, 28(9), 5857-5863.
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. (2010). A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 35(6), 2580-2586.
- 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), 803-811.
- Chen, W. H., Hsu, H. C., Lu, K. M., Lee, W. J., & Lin, T. C. (2011). Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*, 36(5), 3012-3021.
- 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, 847-866.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D., & Engelhard, M. H. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 37(11), 1477-1488.
- Chew, J. J., & Doshi, V. (2011). Recent advances in biomass pretreatment–Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4212-4222.
- Ciolkosz D, Wallace R. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. *Biofuel Bioprod Bior* 2011;5:317–29.
- Conesa, J. A., & Domene, A. (2011). Biomasses pyrolysis and combustion kinetics through n-th order parallel reactions. *Thermochimica Acta*, 523(1), 176-181.
- Coto, O. (2013). Evaluación de la Generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e Identificación de Sector Prioritario. San José, Costa Rica.
- Demeyer, A., Nkana, J. V., & Verloo, M. G. (2001). Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource technology*, 77(3), 287-295.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in energy and combustion science*, 30(2), 219-230.
- Doddapaneni, T. R. K. C., Konttinen, J., Hukka, T. I., & Moilanen, A. (2016). Influence of torrefaction pretreatment on the pyrolysis of Eucalyptus clone: A study on kinetics, reaction mechanism and heat flow. *Industrial Crops and Products*, 92, 244-254.
- Faix, O. (1992). Fourier transform infrared spectroscopy. In *Methods in lignin chemistry* (pp. 83-109). Springer Berlin Heidelberg.
- Fournel, S., Palacios, J.H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M. & Savoie, P. (2015). Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel

boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 247-259. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.022

- Gaitán-Álvarez, J., Moya, R. (2016). Characteristics and properties of pellet fabricated with torrefaction biomass of *Gmelina arborea* and *Dipterix panamensis* at different time. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y Ambiente* 23(3): 325-337.
- Garrote, G., Dominguez, H., & Parajo, J. C. (2001). Study on the deacetylation of hemicelluloses during the hydrothermal processing of Eucalyptus wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 59(1-2), 53-59.
- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B., & Sunan, E. (2009). Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey. *Energy Policy*, 37, 424-431. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.057
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Peña, J. D. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Información tecnológica*, 23(6), 73-86.
- Gosselink, R. J. A., De Jong, E., Guran, B., & Abächerli, A. (2004). Co-ordination network for lignin—standardisation, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). *Industrial Crops and Products*, 20(2), 121-129.
- Granados, D. A., Chejne, F., & Basu, P. (2016). A two dimensional model for torrefaction of large biomass particles. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
- Hill, S. J., Grigsby, W. J., & Hall, P. W. (2013). Chemical and cellulose crystallite changes in *Pinus radiata* during torrefaction. *Biomass and Bioenergy*, 56, 92-98.
- Janvijitsakul, K., & Kuprianov, V. I. (2008). Similarity and modeling of axial CO and NO concentration profiles in a fluidized-bed combustor (co-) firing biomass fuels. *Fuel*, 87(8), 1574-1584.
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364.
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
- Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L. & Raiko, R. (2014). The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass and Bioenergy*, (66): 232-239.
- Kullander, S. (2009). Energy from biomass. *The European Physical Journal Special Topics*, 176,115-125. doi: 10.1140/epjst/e2009-01152-1
- Li, M. Y., Cheng, S. C., Li, D., Wang, S. N., Huang, A. M., & Sun, S. Q. (2015). Structural characterization of steam-heat treated *Tectona grandis* wood analyzed by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy. *Chinese Chemical Letters*, 26(2), 221-225.

- Lionetto, F., Del Sole, R., Cannoletta, D., Vasapollo, G., & Maffezzoli, A. (2012). Monitoring wood degradation during weathering by cellulose crystallinity. *Materials*, 5(10), 1910-1922.
- Matali, S., Rahman, N. A., Idris, S. S., Yaacob, N., & Alias, A. B. (2016). Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. *Procedia Engineering*, 148, 671-678.
- Medic, D., Darr, M., Shah, A., Potter, B., & Zimmerman, J. (2012). Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*, 91(1), 147-154.
- Moya, R. (2004). Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests*, 28, 299-317. doi: 10.1023/B:NEFO.0000040957.83398.e3
- Moya, R., Garita, C. S., Berrocal, A., & Valverde, J. C. (2015). Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fastgrowing plantation species in Costa Rica. *Madera y bosques*, 21, 31-47.
- Moya, R., Rodriguez-Zuñiga, A., Puente-Urbina, A. 2017. Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. *Thermochimica Acta* (In press)
- Nistor, M. T., & Vasile, C. (2013). Influence of the nanoparticle type on the thermal decomposition of the green starch/poly (vinyl alcohol)/montmorillonite nanocomposites. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 111(3), 1903-1919.
- Pandey, K. K., & Theagarajan, K. S. (1997). Analysis of wood surfaces and ground wood by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAS) Fourier transform infrared spectroscopic techniques. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 55(6), 383-390.
- Park, J., Meng, J., Lim, K. H., Rojas, O. J., & Park, S. (2013). Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 100, 199-206.
- Parshetti, G. K., Quek, A., Betha, R., & Balasubramanian, R. (2014). TGA–FTIR investigation of co-combustion characteristics of blends of hydrothermally carbonized oil palm biomass (EFB) and coal. *Fuel Processing Technology*, 118, 228-234.
- Pazos, G. B., & Sotelo, R. D. (1999). Importancia de la lignina en las contracciones de la madera: revisión bibliográfica. *Madera y Bosques*, 5(1), 13-26.
- Peng, J. H., Bi, X. T., Sokhansanj, S., & Lim, C. J. (2013). Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, 111, 411-421.
- Pereira, H., J. Graca and J.C. Rodrigues. 2003. Wood chemistry in relation to quality. In Barnett, J., G. JeEronimidis, eds. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing Ltd, London, 3-40 p.
- Petit, B., & Montagnini, F. (2004). Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forest Ecology and Management*, 199(2), 243-257. doi:10.1016/j.foreco.2004.05.039

- Poletto, M., Zattera, A. J., & Santana, R. M. (2012). Thermal decomposition of wood: kinetics and degradation mechanisms. *Bioresource technology*, 126, 7-12.
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. (2006). Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 77(1), 35-40.
- Puig-Arnavat, M., Shang, L., Sárosy, Z., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2016). From a single pellet press to a bench scale pellet mill—Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 142, 27-33.
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Chen, S., & Wu, J. (2013). Thermal behaviour and kinetic study for woody biomass torrefaction and torrefied biomass pyrolysis by TGA. *Biosystems engineering*, 116(4), 420-426.
- Rousset, P., Aguiar, C., Labbé, N., & Commandré, J. M. (2011). Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresource technology*, 102(17), 8225-8231.
- Roy, M. M., & Corscadden, K. W. (2012). An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove. *Applied Energy*, 99, 206-212.
- Sabil, K. M., Aziz, M. A., Lal, B., & Uemura, Y. (2013). Synthetic indicator on the severity of torrefaction of oil palm biomass residues through mass loss measurement. *Applied energy*, 111, 821-826.
- Sánchez Salas, J., Muro Pérez, G., Flores Rivas, J. D., Jurado Ybarra, E., & Sáenz Mata, J. (2015). Contenido de carbono en un sistema agroforestal pastorilsilvícola del matorral espinoso tamaulipeco. *Ciencia UANL*, 18(74), 57-61.
- Sbirrazzuoli, N., Vyazovkin, S., Mititelu, A., Sladic, C., & Vincent, L. (2003). A Study of Epoxy-Amine Cure Kinetics by Combining Isoconversional Analysis with Temperature Modulated DSC and Dynamic Rheometry. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 204(15), 1815-1821.
- Schroeder, H. A. (2007). Shrinking and swelling differences between hardwoods and softwoods. *Wood and Fiber Science*, 4(1), 20-25.
- Serrano, R., Moya, R., 2011. Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana* 9(21): 12 p.
- Sharma, R. K., Wooten, J. B., Baliga, V. L., Lin, X., Chan, W. G., & Hajaligol, M. R. (2004). Characterization of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*, 83(11), 1469-1482.
- Shebani, AN; Van Reenen, AJ; Meincken, M. 2008. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*. 471: 43-50.
- Stevanic, J. S., & Salmén, L. (2009). Orientation of the wood polymers in the cell wall of spruce wood fibres. *Holzforschung*, 63(5), 497-503.
- Tappi, T. (2002). 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002–2003 TAPPI Test Methods.

- Tenorio, C. & Moya, R. (2012). Evaluation of different approaches for the drying of lignocellulose residues. *BioResources*: 7(3), 3500-3514. doi:10.15376/biores.7.3.3500-3514
- Tenorio, C., Moya, R., 2013. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. *Thermochimica Acta* 563: 12-21
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque*, 37(1), 71-84.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., & Valaert, J. (2014). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1), 482-498. doi:10.15376/biores.10.1.482-498
- Van der Stelt MJC, Gerhauser H, Kiel JHA, Ptasiński KJ. (2011) Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass Bioenergy* 35:3748–62.
- Van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J., & Ptasiński, K. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass Bioenergy*, 35, 3748–3762. doi:10.1016/j.biombioe.2011.06.023
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.
- Wang, G., Luo, Y., Deng, J., Kuang, J., & Zhang, Y. (2011). Pretreatment of biomass by torrefaction. *Chinese Science Bulletin*, 56(14), 1442-1448.
- Wannapeera, J., Fungtammasan, B., & Worasuwannarak, N. (2011). Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 99-105.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Zheng, C., Lee, D. H., & Liang, D. T. (2006). In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels*, 20(1), 388-393.