Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

https://doi.org/10.22463/0122820X.1173

Estudio térmico e infrarrojo de cinco tipos de madera comercializadas en Norte de Santander, para su posible uso como fuente de energía

Thermic and infrared study of five types of wood commercialized in Norte de Santander, for its possible use as an energy source

Estudo térmico e infravermelho de cinco tipos de madeiras comercializadas em Norte de Santander, para seu possível uso como fonte de energia

Yessika Contreras-Valero[1], Yaneth Cardona-Rodríguez[2], Diana Alexandra Torres-Sánchez[3]

Forma de citar: Y. Contreras-Valero, Y. Cardona-Rodríguez, D.A. Torres-Sánchez "Estudio térmico e infrarrojo de cinco tipos de madera comercializadas en Norte de Santander, para su posible uso como fuente de energía", *Respuestas*, vol. 22, no. 2, pp. 36-47 , 2017.

Recibido:
Enero 26 de 2017

Aceptado:
Mayo 12 de 2017

Resumen

Antecedentes: La madera es uno de los recursos naturales más explotados por el hombre; sin embargo, su aprovechamiento conlleva a la producción de cantidades considerables de residuos, los cuales contaminan debido a su descomposición. Por ello, se han buscado posibles usos para estos residuos, dentro de los cuales, está su aprovechamiento potencial para la producción de energía; sin embargo, los residuos contienen diferentes tipos de madera por lo que no se conoce su potencial. **Objetivo:** En el presente trabajo se determinaron las propiedades térmicas de cinco tipos de madera frescas y secas, comercializadas en el departamento Norte de Santander: cedro (*Cedrela montana*), pino (*Cupressus lusitánica mil)*, eucalipto (*Eucalyptus globulos labill)*, guadua (*Guadua angustifolia)* y pardillo (*Cordia gerascanthus*); adicionalmente, se llevó a cabo un análisis Infrarrojo de las mismas. **Métodos:** El comportamiento térmico se determinó con un equipo SDT-Q600 de T.A. Instruments, que realiza simultáneamente Análisis Termogravimétrico y Calorimetría Diferencial de Barrido (TGA/DSC)**.** El contenido energético, fue estudiado usando una bomba de combustión Phillipson modificada y el análisis infrarrojo se llevó a cabo usando un espectrofotómetro infrarrojo FT-IR SHIMADZU Prestige-21 con ATR. **Resultados:** El análisis térmico mostró la presencia de dos pérdidas de masa y tres eventos térmicos (dos endotérmicos y uno exotérmico), relacionados con la evaporación del agua y la degradación de sus componentes químicos, en cuanto al calor de combustión, se encontró una diferencia significativa entre las maderas analizadas. El análisis Infrarrojo permitió corroborar la presencia de celulosa, lignina, hemicelulosa y otros compuestos orgánicos. **Conclusión:** Los análisis realizados a las muestras de madera permitieron establecer sus diferencias y similitudes; adicionalmente, se encontró que pueden utilizarse como fuente de energía o material de construcción.

Palabras claves: análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría de combustión, calorimetría diferencial de barrido (DSC), espectrofotometría infrarroja (FTIR), Madera.

Abstract

Background: Wood is one of the most exploited natural resources by man; however, its use leads to the production of considerable amounts of waste, which pollute due to its decomposition. For this reason, several research have looked for different possible

[1]Ingeniera Química
yemicova_16@hotmail.com
orcid.org/0000-0003-2549-7634
Pamplona-Colombia

[2]Magíster en Química
Docente Universidad de Pamplona
yaneth.cardona@unipamplona.edu.co
orcid.org/0000-0003-3323-7242
Pamplona-Colombia

[3]Doctora en Ciencias-Química
Docente Universidad de Pamplona
datorres@unipamplona.edu.co
orcid.org/0000-0002-0602-9299
Pamplona-Colombia

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

uses for this wastes, among which is, its use as a source of energy; however, waste contains different types of wood then its potential is unknown. **Objective:** In this work, we determined the thermal properties, infrared analysis and combustion heat of five types of fresh and dry wood marketed in Norte de Santander: cedar (*Cedrela montana*), pine (*Cupressus lusitánica mil*), eucalyptus (*Eucalyptus globulos labill*), guadua (*Guadua angustifolia*) and pardillo (*Cordia gerascanthus*). **Methods:** Thermal behavior was determined using a SDT-Q600 equipment (T.A. Instruments) with simultaneous thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry (TGA)/(DSC). The energetic content was studied using a Phillipson modified combustion bomb, and infrared analysis using an infrared spectrophotometer FT-IR-ATR, SHIMADZU Prestige-21. **Results:** Thermal analysis showed the presence two mass losses and three thermal events (2 endothermic and 1 exothermic), these events are due to the water evaporation and the degradation of the chemical components. Each wood has different combustion heat. Infrared analysis allowed to confirm the presence of cellulose, lignin, hemicellulose and other organic compounds. **Conclusion:** The analysis carried out on the wood samples allowed to establish their differences and similarities that can be used to choose each as a source of energy or as a construction material.

Keywords: Thermogravimetric Analysis (TGA), Combustion Calorimetry, Differential Scanning Calorimetry (DSC), Infrared Spectroscopy, Wood.

Resumo

Antecedentes: A madeira é um dos recursos naturais mais explorados pelo homem; no entanto, seu aproveitamento leva à produção de quantidades consideráveis de resíduos, os quais contaminam devido a sua decomposição. Portanto, os possíveis usos para esses resíduos têm sido procurados, dentro deles estaria seu aproveitamento potencial para a produção de energia; no entanto, os resíduos contem diferentes tipos de madeira pelo qual não se conhece seu verdadeiro potencial. **Objetivo:** No presente trabalho determinaram-se as propriedades térmicas de cinco tipos de madeira seca e fresca, comercializadas no estado de Norte de Santander: cedro (*Cedrela montana*), pinheirinho (*Cupressus lusitanica mil)*, eucalipto (*Eucalyptus globulos labill)*, guadua (*Guadua angustifolia)* e cordia (*Cordia gerascanthus*); além disso, foi realizada análise de espectrofotometria no Infra-vermelho das mesmas. **Métodos:** O comportamento térmico se determinou com um equipo SDT-Q600 de T.A. Instruments, que realiza simultaneamente Análise Termogravimétrica e Calorimetria Diferencial de Varredura (ATG/CDV)**.** O conteúdo energético foi estudado usando uma bomba de combustão *Phillipson* modificada e a análise infravermelha foi realizada usando um espectrofotómetro no Infra-vermelho FT-IR SHIMADZU Prestige-21 com ATR. **Resultados:** A análise térmica mostrou a presença de duas perdidas de massa e três eventos térmicos (dois endotérmicos e um exotérmico), relacionados com a evaporação da agua e a degradação de seus componentes químicos, em quanto ao calor de combustão, se encontrou uma diferença significativa entre as madeiras analisadas. A análise no Infra-vermelho permitiu corroborar a presença de celulosa, lignina, hemicelulosa e outros compostos orgânicos. **Conclusão:** As análises realizadas às amostras de madeira permitiram estabelecer suas diferenças e similitudes; além disso, descobriu-se que elas podem ser usadas como fonte de energia ou material de construção.

Palavras-chave: análise termogravimétrica (ATG), calorimetria de combustão, calorimetria diferencial de varredura (CDV), espectrofotometria no Infra-vermelho (EIV), Madeira.

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

1. Introducción

La madera es un tejido estructural fibroso y poroso que se encuentra en la raíz y tallo de los árboles y otras plantas leñosas; es considerado a nivel mundial como materia prima fundamental, debido a que es indispensable para el estilo de vida del hombre actual; es por ello, que es uno de los recursos naturales más explotados por el hombre para la obtención de material de construcción y papel, entre otros. En este material, la fibra de celulosa esta agrupada en paquetes y unidas entre sí por un pegante natural llamado lignina, cuyo mayor porcentaje (95%) está organizado de forma vertical y el resto a lo ancho formando anillos. Las fibras tienen canales por donde circulan o se almacenan sustancias como: agua, aceites, resinas, colorantes y sales [1],[2].

El mercado de productos forestales ocupa a nivel mundial el tercer lugar, después del petróleo y gas, con un valor de transacciones que anualmente ronda los 80 billones de dólares [3], [4] y la desarticulación en los eslabones de su cadena productiva, pueden generar una explotación inadecuada del bosque [5]. De la producción maderable a nivel mundial, Colombia aporta un 0,1%, para el cual se utiliza el 2,06% del potencial forestal del país, ocupando el puesto 64 como productor de madera en rollo industrial. En Norte de Santander, los principales proyectos de reforestación se consolidaron en el municipio de Pamplona, donde se plantaron aproximadamente 4.000 hectáreas. En el resto del departamento se plantaron 1.345 hectáreas y las especies plantadas, corresponden a *Pinus patula (*4.000 hectáreas), de donde se obtiene madera rolliza; *Eucalyptus grandis (*230 hectáreas), *Cordia gerascanthus* (30 hectáreas) y 1.085 hectáreas establecidas con otras especies [6].

A pesar de los beneficios que la madera trae para el ser humano, su aprovechamiento conlleva a la producción de cantidades considerables de residuos, los cuales causan contaminación al medio debido a su descomposición. En los aserraderos, los residuos varían entre 0,05 y 0,15 toneladas de sólidos por tonelada de madera en rollo producida; por lo cual, es de suma importancia encontrar una vía factible para el uso de estos desechos [7]. Por lo tanto, se han buscado posibles usos para los residuos madereros en los últimos años, los cuales incluyen: su uso como materia prima para la producción de pastas, papel, tableros de partículas, aserrín para cubrir pisos de pesebreras, madera triturada para jardines o como productos para compost, también se ha estudiado su uso como materia prima para alimento de ganado, obtención de etanol y como fuente potencial de combustible. El aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía ha despertado un gran interés en la comunidad científica y en general, puesto que a pesar de que el calor producido en este caso es inferior al procedente del petróleo o gas, su costo en comparación con los combustibles fósiles, lo hacen una fuente interesante de calor y energía; sin embargo, dentro de los elementos que pueden influir en la viabilidad de este uso, se encuentra el hecho de que los residuos producidos provienen de diferentes tipos de madera de los cuales no se conoce su potencial para la producción de energía [3], [7]-[11]).

Teniendo en cuenta la importancia de este hecho, en este trabajo se realizó la caracterización térmica de cinco tipos de madera utilizadas en el Departamento de Norte de Santander, mediante calorimetría de combustión, análisis termogravimétrico (TGA) simultáneo con calorimetría diferencial de barrido (DSC) y espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Estos análisis se llevaron a cabo en muestras de las maderas mencionadas en estado fresco y seco.

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

2. Materiales y métodos

2.1 Muestreo e identificación.

Las muestras frescas de los diferentes tipos (guadua, pardillo, pino, eucalipto y cedro) fueron recolectadas en el Municipio de Herrán, departamento Norte de Santander, debido a la disponibilidad del recurso. Las maderas secas fueron proporcionadas por la empresa "Maderas Cúcuta".

La identificación de las especies fue realizada por el biólogo Luis Roberto Sánchez con ayuda de los ejemplares presentes en el Herbario Catatumbo Sarare (HECASA) de la Universidad de Pamplona, encontrando que correspondían a: *Cedrela montana* (Cedro), *Cupressus lusitánica mil* (pino), *Guadua angustifolia* (guadua), *Eucalyptus globulos labill* (eucalipto) y *Cordia gerascanthus* (pardillo). Una vez realizada la identificación, las muestras se trasladaron al laboratorio de Biocalorimetría, en donde se procedió a la manipulación de las mismas, extrayendo virutas de diferentes partes de cada madera, las cuales se homogeneizaron para sus correspondientes análisis. Los ensayos se llevaron a cabo por triplicado, con el fin de verificar la repetibilidad de los resultados.

2.2 Instrumentos, materiales y reactivos

Para el presente estudio se empleó un equipo SDT-Q600 de T.A. Instruments, una bomba de combustión Phillipson modificada, y un espectrofotómetro infrarrojo FT-IR SHIMADZU Prestige-21 con ATR.

2.3 Determinación de las propiedades térmicas

2.3.1 Termogravimetría simultánea con calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC).

La determinación de las propiedades térmicas de las diferentes muestras, se llevó a cabo mediante un equipo SDT-Q600 de T.A. Instruments, de la siguiente forma: una muestra de ~10 mg de madera se introdujo en una cápsula de alúmina de 90µL que se calentó desde temperatura ambiente hasta 700°C con una rampa de calentamiento de 10°C/min, en atmósfera inerte de nitrógeno (100 mL/min), según la metodología recomendada por Sho-Ichi, 2000 y Rodríguez- Añón, 2007 [12], [13].

2.3.2 Calorimetría de combustión.

Se determinó el contenido energético de las muestras de madera mediante una bomba de combustión Phillipson modificada. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente, inyectando oxígeno a una presión de 25 x 10^5 Pa y usando cápsulas de gelatina para la quema de la muestra. La ignición se efectuó mediante la descarga de un capacitor de 5000 µF y un fusible de alambre de níquel de 0,1mm de diámetro. La señal térmica del calorímetro se registró con una interfase UNIDANPLUS (ESYS, Berlín, Alemania).

2.4 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Haciendo uso de un espectrofotómetro infrarrojo FT-IR SHIMADZU Prestige-21 con ATR, se analizaron las muestras, en un intervalo de número de onda desde 600 hasta 4000 cm^{-1} con un total de 40 scan y una resolución de 4 cm^{-1}.

2.5 Análisis estadístico

Las propiedades térmicas fueron determinadas utilizando el *software Universal Analysis* 2000 (*T.A. Instruments, Delaware, USA*). Los resultados de calorimetría de combustión y del análisis térmico, se analizaron con los paquetes estadísticos *Statgraphics* y *Origin pro* (versión de prueba). Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para encontrar si existían diferencias significativas entre los diferentes valores obtenidos.

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

3. Resultados y análisis

3.1 Termogravimetría (TGA)

Mediante este análisis se determinaron dos pérdidas de masa en las muestras (figura 1), tanto en madera fresca como seca. En la tabla 1 se presentan los resultados del porcentaje de pérdida de masa y las temperaturas inicial, intermedia y final de cada una.

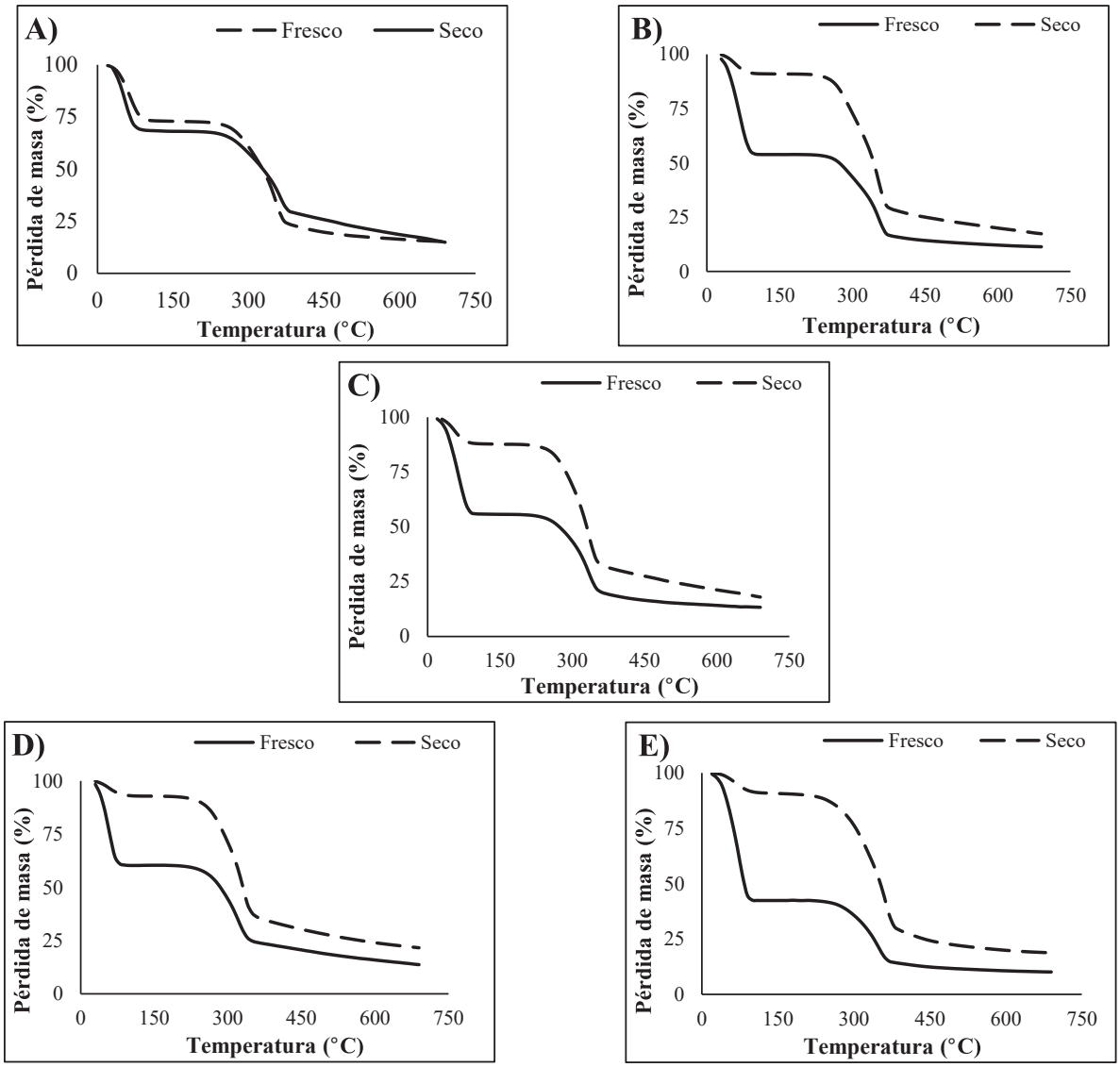

Figura 1. PÉRDIDA DE MASA DE MUESTRAS (FRESCA Y SECA). A) CEDRO, B) EUCALIPTO, C) PARDILLO, D) GUADUA Y E) PINO.
Fuente: Autor

La primera pérdida de masa, se presentó en el rango de temperatura de 23,83 ± 3,37 – 123,42 ± 11,6 °C y es debida a la evaporación del agua y a la descomposición de compuestos de bajo peso molecular. El análisis de varianza multifactorial ($p < 0,05$) con un 95% de confianza, mostró que los dos factores (especie de la muestra y tiempo de secado) tienen un efecto estadísticamente significativo sobre esta pérdida de masa. Las maderas frescas que presentaron mayor y menor pérdida de masa respectivamente, fueron: pino (56,46 ± 3,67 %) y cedro (26,40 ± 0,53%), y las maderas secas que presentaron mayor y menor pérdida de masa respectivamente, fueron cedro (29,14 ± 3,26%) y guadua (6,60 ± 0,50%).

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

Tabla I. RESULTADOS ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO

Tipo	Estado	Pérdida de masa 1				Pérdida de masa 2			
		$T_{Inicial}$ (ºC)	T media (ºC)	T_{Final} (ºC)	Pérdida (%)	$T_{Inicial}$ (ºC)	T media (ºC)	T_{Final} (ºC)	Pérdida (%)
Pino	**Fresco**	24,61 ± 2,03	77,44 ± 3,04	123,42 ± 11,59	56,46 ± 3,57	232,80 ± 14,26	349,12 ± 2,03	389,34 ± 2,51	28,45 ± 2,70
	Seco	23,81 ± 3,37	65,06 ± 5,04	121,43 ± 7,68	9,25 ± 0,26	216,48 ± 5,02	357,96 ± 4,69	397,75 ± 2,39	60,56 ± 1,20
Guadua	**Fresco**	24,79 ± 0,95	62,43 ± 8,31	108,05 ± 10,39	39,06 ± 4,48	207,64 ± 7,39	232,24 ± 1,56	364,64 ± 2,81	37,03 ± 1,10
	Seco	33,74 ± 6,14	58,08 ± 2,05	117,27 ± 5,38	6,29 ± 0,37	218,45 ± 6,88	332,35 ± 1,02	382,83 ± 8,37	57,55 ± 0,33
Eucalipto	**Fresco**	29,05 ± 2,92	63,22 ± 6,14	113,24 ± 5,85	40,38 ± 8,36	231,62 ± 3,69	354,24 ± 1,02	385,73 ± 3,02	38,80 ± 2,28
	Seco	25,90 ± 5,50	53,57 ± 3,31	111,70 ± 8,29	8,79 ± 0,43	233,06 ± 10,78	355,29 ± 2,37	388,89 ± 2,97	64,37 ± 2,67
Cedro	**Fresco**	26,88 ± 4,75	61,74 ± 6,16	112,37 ± 8,19	31,33 ± 2,48	220,91 ± 5,98	353,97 ± 1,15	392,66 ± 3,27	48,45 ± 0,97
	Seco	30,13 ± 5,36	55,78 ± 1,38	114,36 ± 8,91	26,4 ± 0,53	221,4 ± 11,04	364,15 ± 0,77	399,74 ± 1,75	39,21 ± 0,37
Pardillo	**Fresco**	29,25 ± 3,65	64,84 ± 7,65	106,40 ± 2,68	38,24 ± 5,96	220,68 ± 9,36	334,08 ± 1,99	77,31 ± 3,02	37,98 ± 3,64
	Seco	31,24 ± 6,01	53,57 ± 1,75	106,40 ± 1,67	11,07 ± 0,55	205,43 ± 1,76	333,42 ± 2,89	371,45 ± 4,99	54,26 ± 1,30

Fuente: Autor

El análisis estadístico mostró en cuanto a la primera pérdida de masa para las muestras frescas existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre cedro-pino y parillo-guadua-eucalipto; aunque, no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p > 0,05$). En las muestras secas, se encontraron cuatro grupos homogéneos: guadua-eucalipto-pino, ecualipto-pino, pardillo y cedro, dentro de los cuales, no hay diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) con un 95% de confianza.

La segunda pérdida de peso presentada en las muestras (205,43 ± 1,76 ºC – 399,74 ± 1,75ºC) es debida a la degradación de los componentes de las muestras (celulosa, hemicelulosa y lignina). Las temperaturas teóricas de descomposición térmica, de estos compuestos orgánicos, son: 260 °C - 280 °C (celulosa), 220 °C - 315 °C (hemicelulosa) y 200 °C - 700 °C (lignina) [14]-[17]. Al comparar las pérdidas de masa obtenidas en estos rangos, se observa que las maderas que presentaron mayor y menor pérdida fueron: cedro (48,45 ± 0,97 %) y pino (28,45 ± 2,70%) para las muestras frescas y eucalipto (64,37 ± 2,67%) y cedro (39,21 ± 0,37%) para las muestras secas. El orden decreciente de pérdida de masa en las muestras frescas, fue: cedro (48,45%), eucalipto (38,88%), pardillo (37,98%), guadua (37,03%) y pino (28,45%), registrando temperaturas iniciales de pérdida de 220,91 °C, 231,62 °C, 220,5 °C, 207,64 °C y 232,8 °C respectivamente. En cuanto a las muestras secas, el eucalipto fue el que presentó mayor pérdida de masa (64,37 ± 2,67%), seguido de pino (60,56 ± 1,20%), guadua (57,55 ± 0,34%), pardillo (54,26±1,30%) y cedro (39,21 ± 0,37%). Las diferencias en las temperaturas de descomposición de la lignina, celulosa y hemicelulosa encontradas en este estudio (205,43 – 399,74°C) con las reportadas en literatura (200 – 700°C), podrían deberse a la presencia de otras sustancias en la muestra y al mayor grado de ordenamiento en los polímeros comerciales (valor teórico) en comparación con los presentes en la madera [14], [15], [18].

El análisis multifactorial realizado a los resultados de la segunda pérdida de masa (degradación de los compuestos de la madera) reveló la presencia de tres grupos homogéneos para la muestra fresca (pino, guadua-pardillo-eucalipto y cedro), no presentando diferencias estadísticamente significativas dentro del mismo grupo ($p>0,05$), pero sí entre grupos ($p<0,05$), con un 95% de nivel de confianza. En cuanto a las muestras secas, se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre todas ($p<0,05$).

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

3.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La tabla II muestra los resultados obtenidos mediante calorimetría diferencial de barrido. Los termogramas correspondientes se presentan en la figura 2, en los cuales se observan tres transiciones térmicas. La primera transición es endotérmica y se atribuye principalmente a la evaporación del agua en las muestras. El rango de temperatura de esta transición (21,37 ± 3,52°C – 153,65 ± 9,36°C), es acorde a lo reportado en la literatura [14], [19], [20]. A ~ 200°C inicia la descomposición de los componentes químicos de la madera, que se observan en la segunda (endotérmica) y tercera transición (exotérmica), ésta última está relacionada con la formación de productos gaseosos liberados durante la pirolisis [13], [19], [21], [22].

La segunda transición no se presentó en las muestras frescas de pino y guadua. El análisis de varianza de los valores de entalpía de las diferentes transiciones, mostró que la muestra fresca presentó tres grupos homogéneos para la primera entalpía (cedro-guadua, guadua-pardillo-eucalipto y pino), dos grupos para la segunda entalpía (cedro-pardillo y eucalipto) y dos grupos para la tercera entalpía (eucalipto-pardillo-pino y pardillo-pino-cedro-guadua). Adicionalmente, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las especies que conforman un grupo, aunque sí entre los grupos ($p > 0,05$), con un 95% de confianza.

Tabla II. RESULTADOS CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Tipo	Estado	Transición 1		Transición 2		Transición 3	
		T_{media} (ºC)	Entalpía (J/g)	T_{media} (ºC)	Entalpía (J/g)	T_{media} (ºC)	Entalpía (J/g)
Pino	Fresco	87,29 ± 3,94	6962,67 ± 592,89	-	-	359,74 ± 1,50	87,22 ± 15,43
	Seco	77,26 ± 2,32	1198,97 ± 528,39	229,27 ± 25,54	104,57 ± 37,32	367,66 ± 3,32	214,43 ± 53,27
Guadua	Fresco	73,14 ± 8,68	4266,33 ± 886,56	-	-	339,75 ± 0,57	120,77 ± 8,67
	Seco	74,07 ± 1,35	461,67 ± 216,29	220,94 ± 10,72	247,5 ± 68,95	381,61 ± 1,85	38,16 ± 6
Eucalipto	Fresco	73,77 ± 4,38	4523,67 ± 147,56	200,63 ± 0,085	51,65 ± 24,79	358,07 ± 1,14	42,91 ± 7,31
	Seco	65,02 ± 4,16	1300,67 ± 37,00	200,44 ± 0,14	57,73 ± 22,15	365,04 ± 0,33	211,95 ± 103
Cedro	Fresco	73,20 ± 4,73	3188,67 ± 302,03	200,6 ± 0,14	16,84 ± 7,22	361,96 ± 0,52	118,7 ± 72,6
	Seco	66,48 ± 1,73	2882 ± 567,57	200,56 ± 0,08	25,86 ± 3,17	378,75 ± 7,01	86,43 ± 35,45
Pardillo	Fresco	75,32 ± 5,21	4503,67 ± 785,27	200,47 ± 0,02	20,36 ± 6,29	345,39± 5,00	61,23± 7,01
	Seco	64,77 ± 3,76	1397,33 ± 220,92	200,43 ± 0,28	20,63 ± 7,28	376,75 ± 0,26	17,26 ± 4,52

Fuente: Autor

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

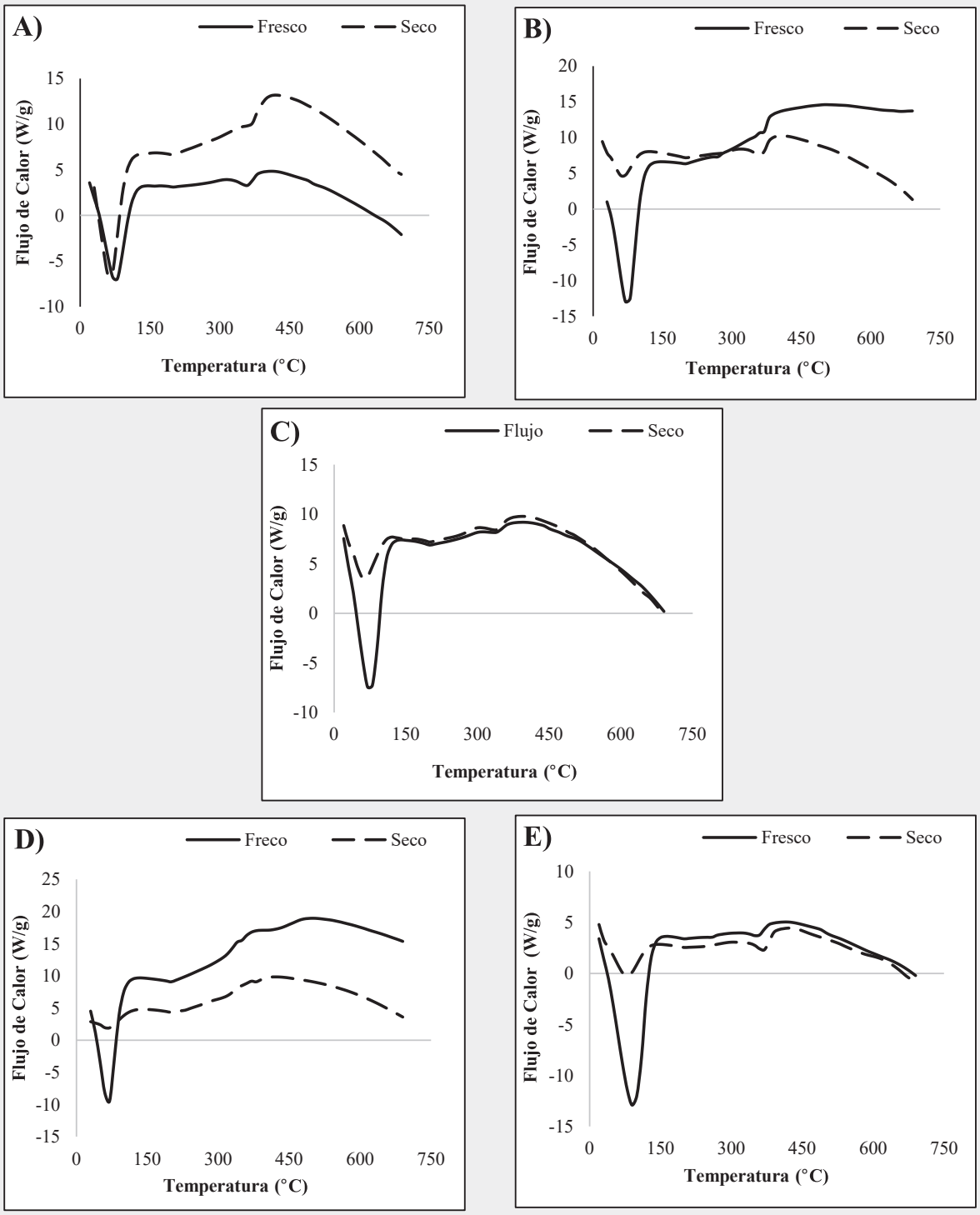

Figura 2. TERMOGRAMAS DE MUESTRAS FRESCAS Y SECAS A) CEDRO, B) EUCALIPTO, C) PARDILLO, D) GUADUA Y E) PINO.
Fuente: Autor

3.3 Espectrofotometría infrarroja (FTIR-ATR)

En la figura 3 se muestran los espectros IR para las maderas frescas y secas. En la tabla III se presentan los grupos funcionales identificados en las muestras. La presencia de algunos grupos como el hidroxilo alifático y el enlace C-C, pueden estar presentes debido a la ruptura de las cadenas laterales de

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

polímeros de lignina. La presencia del grupo –OH, se debe alcoholes, agua y fenoles. Adicionalmente, los espectros muestran las bandas correspondientes a la celulosa, lignina y hemicelulosa [12], [17], [23].

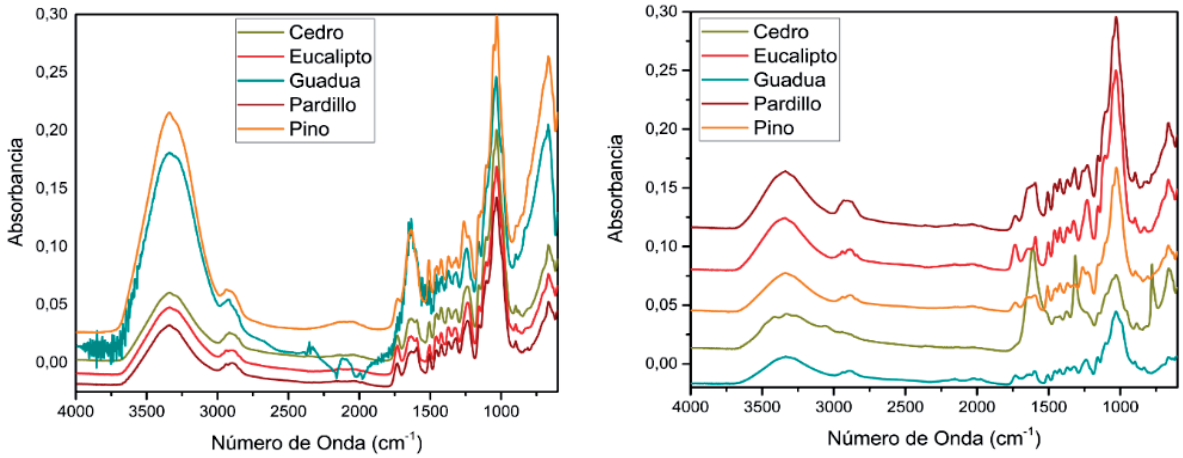

Figura 3. ESPECTROS IR DE LAS MADERAS A) FRESCAS, B) SECAS.
Fuente: Autor

Otros compuestos orgánicos presente son hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas y ácidos alifáticos. El espectro de la guadua fue el único que presentó las bandas características del –CO; cuya presencia, puede deberse a la ruptura de enlaces éter y/o carbonilo [19], [24].

Tabla III. GRUPOS FUNCIONALES IDENTIFICADOS EN LOS ESPECTROS IR DE LAS MUESTRAS
Fuente: Autor

Grupo Funcional	Intervalo	Muestra	Número de onda				
			Pino	Eucalipto	Cedro	Guadua	Pardillo
Hidroxilo (-OH)	3329-3340	fresco	3340	3336	3339	3338	3339
		seco	3338	3340	3329	3338	3336
C-H	2877-3036	fresco	2937	2900	2917	2919	2898
		seco	2882	2889	3060	2896	2902
Carbonilo C=O	2351-2359	fresco	-	-	-	2351	
		seco	-	-	-	-	-
CO	2122-2155	fresco	-	-	-	2122	-
		seco	-	-	-	2156	-
CO	2024-2027	fresco	-	-	-	-	-
		seco	-	-	-	2024	-
Carbonilo C=O	1730-1782	fresco	1730	1732	1732	-	1733
		seco	1733	1733	-	1731	1735
C=O	1612-1643	fresco	1632	1637	1638	1634	-
		seco	-	-	1612	-	-
Lignina	1591-1602	fresco	-	1595	1593	-	1592
		seco	1597	1592	-	1602	1592
Lignina	1502-1510	fresco	1510	1502	1507	1510	1507
		seco	1507	1502	-	1505	1507
CH_2	1450-1460	fresco	1454	1457	1454	1454	1453
		seco	1450	1459	-	1455	1457
CH	1418-1425	fresco	1422	1421	1423	1418	1421
		seco	1422	1421	1422	1420	1421
C-H y OH	1366-1373	fresco	1370	1373	1372	1371	1373
		seco	1368	1369	1372	1369	1371
CH_2	1315-1324	fresco	1318	1322	1317	1318	1318
		Seco	1316	1325	1315	1322	1318
Carboxilo C-O	1262-1263	Fresco	1262	-	-	-	-
		seco	1263	-	-	-	-

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

C=O, C-O y C-C	1231-1243	fresco	-	1238	1239	1243	1234
		seco	-	1232	-	1239	1231
C-O-C y C=O	1154-1160	fresco	1155	1157	1157	1155	1157
		seco	1157	1154	-	1158	1154
C-O-C y C-O	1102-1109	fresco	1103	1104	1107	-	1105
		seco	1106	1108	-	1105	1102
C-O	1049-1054	fresco	1054	-	-	-	-
		seco	1049	-	-	-	-
Deformación C-O	1027-1033	fresco	1029	1032	1032	1033	1033
		seco	1027	1032	1029	1030	1029
C-H	893-899	fresco	895	896	899	895	898
		seco	893	896	884	896	896
Anillo aromático trisustituido	807-834	fresco	-	-	-	-	829
		seco	819	831	-	834	834
C-H	778	fresco	-	-	-	-	-
		seco	-	-	-	-	-
C-C	661-668	fresco	664	667	666	667	664
		seco	666	664	662	662	661

3.4 Calorimetría de combustión

El "calor de combustión" es la cantidad de energía que se disipa durante la combustión completa de una unidad de masa, de una sustancia en la condición de que los productos de combustión se enfríen a la temperatura inicial; es decir, que el calor de condensación del vapor de agua está incluido. Los resultados obtenidos mediante el análisis de FTIR, confirmaron que la madera se compone esencialmente de carbono, hidrogeno y oxígeno, además de algunas sustancias minerales.

La bomba de combustión se calibró usando el ácido benzoico como estándar cuyo calor de combustión fue de 54.647 kJ/V. Las muestras se introdujeron en cápsulas de gelatina cuyo calor de combustión fue de 16.9425 kJ/g, requerido para determinar el calor de combustión de las muestras.

En la tabla IV se presentan los calores de combustión de las muestras de madera, que fueron mayores para las muestras secas. Las maderas frescas, presentaron valores similares (8,04-9,19 kJ/g); a excepción de la guadua, la cual presentó un calor de combustión menor (4,26 kJ/g). Estos valores indicarían que la guadua sería la menos indicada para la obtención de energía, pero sería la más recomendada para utilizarse como material de construcción, puesto que los riesgos de quema serían menores. En las muestras secas, se observó que el eucalipto tiene el mayor calor de combustión (16,27 kJ/g), seguido del pino (15,03 kJ/g) y el cedro (14,74 kJ/g), los cuales tienen un calor de combustión relativamente similar, por lo tanto, podrían utilizarse para la obtención de energía. Los calores de combustión de las muestras secas de guadua y pardillo no pudieron determinarse.

Tabla IV. CALORES DE COMBUSTIÓN

Tipo	Muestra	Calor de combustión
Pino	Fresco	9,19 ± 1,61
	Seco	15,03 ± 1,77
Guadua	Fresco	4,26 ±2,77
	Seco	-
Eucalipto	Fresco	8,88 ± 2,27
	Seco	16,27
Cedro	Fresco	8,04 ± 0,74
	Seco	14,74 ± 4,45
Pardillo	Fresco	8,33 ± 3,03
	Seco	-

Fuente: Autor

4. Conclusiones

El análisis termogravimétrico, mostró que las maderas frescas y secas (pino, eucalipto, guadua, pardillo y cedro) presentan dos pérdidas de masa, la primera (23,83 ± 3,37°C – 123,42 ± 11,6 °C) se relaciona con la evaporación del agua y la descomposición de compuestos de bajo peso molecular y la segunda (205,43 ± 1,76°C – 399,74 ± 1,75ºC)

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

es debida a la degradación de los componentes de las muestras, que en su mayoría son lignina, celulosa y hemicelulosa.

El cedro fresco presenta menor cantidad de agua y compuestos de bajo peso molecular, también menor pérdida de masa durante el proceso de secado, mientras que la guadua presenta la mayor pérdida de masa durante su etapa de secado. Las dferencias en los porcentajes de pérdida de masa podría estar muy relacionada con el contenido de lignina en la guadua fresca y de hemicelulosa en el cedro y el pardillo.

Las muestras de pino, eucalipto, guadua, pardillo y cedro, exhibieron tres transiciones térmicas; a excepción de las muestras frescas de pino y guadua, que no presentaron la segunda transición. La primera transición (endotérmica) puede estar relacionada con la vaporización del agua y algunos compuestos de bajo peso molecular, la segunda transición (endotérmica) y la tercera transición (exotérmica), se relacionan con la descomposición de los componentes químicos de la madera.

En los espectros IR se presentaron las bandas características de los diversos compuestos como: celulosa, lignina y hemicelulosa (componentes mayoritarios de la pared celular), e hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas y ácidos alifáticos (componentes extraíbles de la madera).

Los valores de los calores de combustión indican que se recomienda el uso del eucalipto y el pino (secos) como fuente de energía, pero no como material de construcción, debido a que incluso frescos presentan calores de combustión relativamente altos. La guadua se recomienda como material de construcción.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Pamplona por su apoyo económico durante la realización de este trabajo

6. Referencias

[1] D. Q. Serrano, “Colección de especies maderables “xiloteca” de la cuenca baja del catatumbo”. Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona. 2008.

[2] S.A. Barajas. “Documentación técnica del uso de maderas en proyectos constructivos de viviedas. Bucaramanga”, Universidad Industrial de Santander. 2004

[3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Comercio internacional de productos forestales. 2011.

[4] Covaleda HJM. La competitividad de las cadenas agroproductivas en Colombia. Bogotá, Colombia. 2005.

[5] Solano-Becerra E, Peñaranda-Martínez CY, Parada-Rivera O-G. Identificación y caracterización de los eslabones, actores y agentes de la cadena productiva forestal madera muebles de la región Norte de Santander. Respuestas. 14(1):66-76. 2009

[6] Guerrero DR, González EV, chitiva GH. Guía para las plantaciones forestales comerciales: Norte de Santander. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 1998.

[7] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales. Roma, Italia. 2004.

[8] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Aprovechamiento potencial de los residuos de madera para la producción de energía [En línea] Disponible en:http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269S10.htm. [Citada en Agosto 2016]

[9] Núñez-Regueira L, et al. Determination of calorific values of forest waste

Respuestas
Cúcuta-Colombia
Vol. 22
No. 2
Julio - Dic. 2017
ISSN 0122-820X
E-ISSN 2422-5053
PP: 36-47

biomass by static bomb calorimetry. Thermochimica Acta. 371(1–2):23-31. 2001

[10] Ríos RDC. Aprovechamiento de los residuos de la madera y su posible reutilización en fabricación de biomasa generada en Bogotá. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2014.

[11] Jaén RL. Factibilidad del empleo de los residuos de la industria de la madera para la obtención de energía eléctrica.

[12] Rodríguez-Añón JA, Proupín-Castiñeiras J, Villanueva-López M, Mouriño-Carballido B. Development of an experimental procedure for energy evaluation of forest communities by calorimetry and thermal analysis. Thermochimica Acta. 458(1–2):5-10. 2007.

[13] Tsujiyama S-i, Miyamori A. Assignment of DSC thermograms of wood and its components. Thermochimica Acta. 351(1–2):177-81. 2000.

[14] Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel. 86(12–13):1781-8. 2007.

[15] Morán J. Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra de sisal-caracterización. Asociación Argentina de Materiales. 2008.

[16] Leal SR. Degradación química de la madera y PET reciclado y su aplicación en la síntesis de resinas poliéster: Universidad Autonoma de Nuevo León. 2011.

[17] Alvarez VA, Vázquez A. Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 37(10):1672-80.2006.

[18] Liodakis S, Tsapara V, Agiovlasitis IP, Vorisis D. Thermal analysis of Pinus sylvestris L. wood samples treated with a new gel–mineral mixture of short- and long-term fire retardants. Thermochimica Acta. 568:156-60. 2013.

[19] Fu P, Hu S, Xiang J, Sun L, Su S, An S. Study on the gas evolution and char structural change during pyrolysis of cotton stalk. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 97:130-6. 2012.

[20] Chen J-b, Zhou Q, Sun S-q. Direct chemical characterization of natural wood resins by temperature-resolved and space-resolved Fourier transform infrared spectroscopy. Journal of Molecular Structure. 1115:55-62. 2016.

[21] Y. Liao. Mechanism study of cellulose pyrolysis. HangZhou, China: ZheJiang University. 2003.

[22] K.K. Pandey, A.J. Pitman. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. International Biodeterioration & Biodegradation. 52(3):151-60. 2003.

[23] Q. Liu, S. Wang, Y. Zheng, Z. Luo and K. Cen. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG–FTIR analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.;82(1):170-7. 2008.

[24] D. Chen, D. Liu, H. Zhang, Y. Chen and Q Li. Bamboo pyrolysis using TG–FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields. Fuel. 148:79-86. 2015.