

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE INDUSTRIA

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE RESIDUOS DE 10 ESPECIES FORESTALES
DE RÁPIDO CRECIMIENTO**

(DOCUMENTO I)

INVESTIGADORES:

*Ing. Roger Moya R. Ph.D.
Ing. Carolina Tenorio M. Lic.*

MARZO, 2013

PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE RESIDUOS DE 10 ESPECIES FORESTALES DE RÁPIDO CRECIMIENTO

RESUMEN

Aunque, los residuos de plantaciones forestales de rápido crecimiento en los trópicos recientemente han tomado importancia para su aprovechamiento en energía, aún no se cuenta con la información suficiente sobre sus características de combustión y degradación térmica y en lo relacionado al flujo del agua durante el secado. De forma tal, que el presente estudio tuvo como objetivos determinar el poder calórico (PC) e índice de combustibilidad (FVI) y la relación de estos con la humedad, composición química y fracción de carbono. Determinar el comportamiento térmico por análisis termogravimétrico (TGA) y las etapas que intervienen en los procesos de quemado, bajo distintos contenidos de humedad (CH). Determinar el flujo de agua mediante el coeficiente de difusión (D) de astillas de madera de distintas dimensiones, y conocer el efecto del peso específico básico (PE) y del CH sobre D , para las 10 especies más utilizadas en plantaciones forestales en Costa Rica. Los resultados mostraron que el PC máximo varió de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen. No se presentó una consistencia con respecto a cual tipo de madera (albura o duramen) presenta el mayor o menor valor de PC. En el caso del FVI, se presentaron grandes variaciones entre las especies. Se encontró que el contenido de carbono, nitrógeno y lignina, la cantidad de cenizas y los extraíbles en diclorometano afectaron el PC en la madera de duramen. En tanto que en la madera de albura, la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno y la cantidad de cenizas afectaron el PC. El FVI fue afectado por la cantidad de carbono, los extraíbles en NaOH y diclorometano. En el análisis del TGA los resultados indican que especies como *B. quinata*, *V. guatemalensis* y *G. arborea* son especies de mayor estabilidad térmica y con etapas de combustión poco definidas, lo que las hace menos aptas para un proceso de combustión. Por el contrario, las especies *T. grandis*, *S. macrophylla* y *C. lusitanica* poseen una estabilidad térmica menor, pero un proceso de combustión con etapas bastante definidas, lo cual hace que estas especies sean más aptas en procesos de combustión. En tanto que el resto de las especies *A. mangium*, *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga* son especies con propiedades de combustión aceptables que ofrecen los diferentes parámetros de combustión fácilmente identificables y estabilidad térmica moderada. En la determinación de los D , los resultados obtenidos señalan que el tiempo de secado de las astillas está relacionado con el tipo de madera (albura o duramen) y con el CH que presenten las especies, y con los largos de las astillas. Así mismo se observó, que el D de las especies está relacionado en forma positiva con el CH y en forma negativa con el PE. Además, el largo de las astillas también presentó una influencia en D .

Palabras clave: poder calórico, índice de combustibilidad, análisis termogravimétrico, degradación térmica, quemado, contenido de humedad, propiedades químicas, extractivos, tiempo de secado, contenido de humedad, peso específico.

ENERGETIC PARAMETERS OF RESIDUES FROM 10 FAST GROWING FORESTRY SPECIES

SUMMARY

Although, residues from fast growing forest plantations in the tropics have recently become important for energy use, there is not yet enough information on their combustion characteristics and thermal degradation and in relation to water flow during drying. The objective of this study was to determine the calorific value (PC) and fuelwood value index (FVI) and their relationship with moisture content (CH), chemical composition and carbon fraction. Also, to determine thermal behavior by thermogravimetric analysis (TGA) and the steps involved in burning processes under different CH. The water flow was determined by the diffusion coefficient (D) of wood chips of various sizes, as well as the effect of specific gravity (PE) and the CH on D , for 10 species used in forest plantations Costa Rica. The results showed a ranged of the maximum PC from 16,500 to 20,594 kJ/kg, for sapwood and 16,258 to 20,119 kJ/kg, for heartwood. No consistency was presented in which type of wood (sapwood or heartwood) has the highest or lowest value of PC. In the case of FVI, there were large variations between species. It was found that carbon, nitrogen, lignin and ash content, and the amount of extractives in dichloromethane, affected the PC in heartwood. While in sapwood, the amount of extractives in ethanol-toluene and ash content, affected the PC. The FVI was affected by the amount of carbon, NaOH and dichloromethane extractives. The results of TGA analysis indicated that *B. quinata*, *V. guatemalensis* and *G. arborea* are the species with higher thermal stability, but with combustion stages poorly defined, making them less suitable for a combustion process. By contrast, *T. grandis*, *S. macrophylla* and *C. lusitanica* have a lower thermal stability, but a combustion process with defined stages, which makes them more suitable species in combustion processes. While the rest of the species *A. mangium*, *T. Amazon*, *A. acuminata* and *T. oblonga* have acceptable combustion properties offered by different combustion parameters easily identifiable and moderate thermal stability. In the determination of D , the results obtained show that the drying time of the chip is related to the type of wood (sapwood or heartwood), the CH and the chips lengths. It was also noted that D is positively related to CH and negatively with PE. In addition, the chips lengths also had an influence on D .

Keywords: calorific value, fuelwood value index, thermogravimetric analysis, thermal degradation, burned, moisture content, chemical properties, extractives, drying time, moisture content, specific gravity.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	2
SUMMARY	3
ÍNDICE GENERAL.....	4
1. INTRODUCCION	6
2. METODOLOGÍA	7
2.1. Material utilizado y muestreo	7
2.2. Obtención de muestras.....	8
2.3. Características de combustión	9
2.4. Determinación del poder calórico.....	10
2.5. Determinación del contenido de humedad en verde, peso específico y densidad	10
2.6. Determinación de las propiedades químicas.....	10
2.7. Extraíbles en diferentes solventes.....	10
2.8. Análisis termogravimétrico	11
2.9. Análisis de quemado.....	11
2.10. Difusión de la humedad.....	12
2.11. Análisis estadísticos.....	13
3. RESULTADOS	14

3.1. Parámetros calorimétricos	14
3.2. Variación del poder calórico con el contenido de humedad.....	15
3.3. Propiedades físicas y químicas	19
3.4. Cantidad de extraíbles.....	20
3.5. Efecto de las propiedades físicas y químicas y del contenido de extraíbles en los parámetros energéticos.	22
3.6. Análisis termogravimétrico (TGA y DTG)	24
3.7. Características de quemado	30
3.8. Variación del contenido de humedad	37
3.9. Coeficientes de difusión	40
3.1. Relación del coeficiente de difusión con el contenido de humedad y el peso específico 42	
4. CONCLUSIONES	46
5. AGRADECIMIENTOS.....	47
6. BIBLIOGRAFÍA	48

1. INTRODUCCION

Costa Rica es un país pequeño, que ha introducido gran variedad de especies para la reforestación, orientadas principalmente a la producción de madera aserrada (Moya 2004a). Sin embargo, solo unas pocas especies nativas y exóticas han adquirido importancia comercial en diversos proyectos de reforestación debido principalmente al conocimiento limitado de sus procesos genéticos, reproductivos y de manejo (Murillo et al 2001). Especies de relativo rápido crecimiento (con períodos de rotación de menos de 25 años), como *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas), han demostrado excelentes resultados como especies de reforestación en plantaciones forestales en Costa Rica (Murillo et al. 2001, Pérez y Kanninen 2001, Petit y Montagnini 2004, Moya 2004a).

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global, amplias investigaciones se han llevado a cabo para encontrar fuentes de energía fiable y renovable (Berndes et al. 2003). La biomasa se ha convertido en uno de los principales recursos de la bioenergía para hacer frente al agotamiento de los recursos de los combustibles fósiles y a la crisis del calentamiento global (Abdullah et al. 2010, Offerman et al. 2011). Entre las biomásas utilizadas con fines de combustión se encuentra la biomasa proveniente de cultivos leñosos de corta rotación, residuos agrícolas, maderables e industriales, papel, plantas herbáceas, pastos, plantas acuáticas y otros materiales (Demirbas 2004). Así mismo en el proceso de transformación y aserrío de trozas se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables (Offerman et al. 2011). No obstante, a pesar de la importancia que representa la madera como fuente de biomasa, aún existen limitantes en el conocimiento de las propiedades energéticas y del comportamiento de este tipo de material durante los procesos de combustión y degradación térmica, especialmente para las especies de países tropicales (Castro et al. 2007).

Se ha mencionado que el poder calórico neto de las maderas varía de 17600 a 18700 kJ por kg de materia seca. Sin embargo, este valor depende de muchos factores (Reuter 2011), entre los que se destaca la humedad presente en el residuo, la influencia de los extractivos, la cantidad de carbono, hidrógeno, y oxígeno presente en la madera, celulosas, hemicelulosas, ligninas y la proporción de otros componentes químicos que presenta la madera (Fuwapi 1989, Mckendry 2002). Las maderas tropicales, por su parte, en general poseen proporciones diferentes de carbono, oxígeno e hidrógeno y desde luego diferencias en la cantidad de extractivos (Sjöström 1993). Pero a pesar de esta diferencia, los valores de poder calórico, otros parámetros energéticos y otras características de las maderas, han sido tomados de estudios realizados para especies de clima templados, lo cual puede traer consigo problemas en los cálculos energéticos en el momento de aprovechar estas especies tropicales o al utilizar los residuos en los aserraderos.

Muchos estudios se han realizado en especies maderables para investigar las características de combustión y descomposición térmica para diferentes objetivos

(Demibras 2004). Los procesos de combustión y pirólisis han sido ampliamente estudiados mediante la técnica de termogravimetría (TGA) desde el año 1970 (Ramiah 1970). Para los últimos años esta técnica ha sido utilizada con el fin de conocer el comportamiento termogravimétrico de distintos materiales como virutas de madera, cáscaras de distintas semillas, salvados de trigo, residuos del cultivo de palma africana y del arroz y diversos aceites, entre otros materiales (Gasparovic et al. 2010, Ozgur et al. 2012, Abdullah et al. 2010). La técnica TGA aunque es muy utilizada, presenta la limitante de que en muchos casos las pruebas son realizadas en una atmósfera neutra o con nitrógeno, dejando de lado la presencia de oxígeno, que es uno de los elementos más importantes en los procesos de combustión (Nimmo et al. 2010).

Para la madera como material energético, aparte de su comportamiento termogravimétrico, sus características de combustión también juegan un papel importante, ya que dichas características son determinadas mediante pruebas realizadas en condiciones reales de combustión, en presencia de oxígeno (Castro et al. 2007). Un estudio importante realizado en especies tropicales es el llevado a cabo por Castro et al. (2007), donde se investigaron las características de quemado de cilindros de madera de *Tabebuia rosco-alba* y se encontró que el contenido de humedad afecta en forma significativa las fases de secado y pirólisis, pero no la fase de incandescencia, señalando que para altos contenidos de humedad no se produce ignición debido a liberación relativamente lenta de volátiles o a la liberación simultánea de volátiles y agua.

Los residuos de plantaciones forestales de rápido crecimiento o plantaciones energéticas en algunas regiones tropicales recientemente han tomado importancia por la cantidad de energía que se puede obtener de ellos (Kumar 1992). Sin embargo, aún no se cuenta con la información de las características de combustión y degradación térmica de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones que determinen los parámetros energéticos relacionados con estos procesos. De forma tal, que el presente estudio tuvo como objetivos determinar los principales parámetros energéticos (poder calórico e índice de combustibilidad) y la relación de estos con la humedad, composición química (lignina, celulosa y extractivos) y fracción de carbono. Determinar el comportamiento térmico por análisis termogravimétrico (TGA) y las etapas que intervienen en los procesos de quemado, bajo distintos contenidos de humedad. Además del coeficiente de difusión de astillas de madera de distintas dimensiones, así como conocer el efecto del peso específico básico y del contenido de humedad sobre el coeficiente de difusión, para las 10 especies más utilizadas en plantaciones forestales en Costa Rica. Esta información ayudará a las industrias, reforestadoras y a otros entes a dar uso integral de la materia prima generada en las plantaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1. Material utilizado y muestreo

Diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica fueron utilizadas. El rango de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. La Tabla 1,

presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones. Tres árboles fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de cada plantación. Los árboles muestreados presentaban buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. De cada árbol fueron cortadas dos trozas de 1 metro, desde la base del árbol y fueron pintadas en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Tabla 1. Características dasométricas de las plantaciones utilizadas.

Especies	Tipo de madera	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro (cm)	Peso específico	Contenido de humedad verde (%)
<i>Acacia mangium</i>	Duramen	6	800	11,89	17,87	0,37	192,62
<i>Alnus acuminata</i>	Albura	11	338	20,99	27,90	0,36	87,21
<i>Bombacopsis quinata</i>	Albura	14	265	22,58	36,99	0,32	173,33
<i>Cupressus lusitanica</i>	Duramen	18	400	17,60	33,65	0,42	83,49
<i>Gmelina arborea</i>	Albura	6	1000	15,90	20,60	0,39	112,68
	Duramen						142,60
<i>Swietenia macrophylla</i>	Duramen	21	21	9,49	18,15	0,54	72,50
	Albura						121,80
<i>Tectona grandis</i>	Duramen	9	509	14,99	20,50	0,49	144,79
<i>Terminalia amazonia</i>	Albura	12	378	18,54	21,48	0,51	71,12
<i>Terminalia oblonga</i>	Albura	20	221	14,35	23,48	0,60	59,52
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Albura	10	641	21,83	23,07	0,26	188,66

2.2. Obtención de muestras

Sobre la primera troza extraída del árbol fueron cortadas secciones transversales con espesores de 10 cm, 7 cm y 5 cm (Figura 1a), aproximadamente de 3-4 secciones de cada espesor. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad, y luego en la sección de albura fueron extraídas 5 astillas para cada uno de los siguientes anchos, 10 cm, 6.3 cm y 4.5 cm y de 1 cm de espesor (Figura 1b), dimensiones correspondientes a los largos, anchos y espesores permitidos en la norma Standards-Specifications and properties for Wood Chip de la unión europea (UNI CEN/TS, 2005). Dichas astillas fueron utilizadas para determinar el contenido de humedad (CH), el peso específico (PE), la densidad en condición verde (Dv) y para realizar las pruebas de difusión del agua. En el caso de que se presentara madera de duramen también se obtuvieron 5 astillas de cada ancho y largo mencionado. Es importante mencionar que las astillas fueron cortadas con la ayuda de un cuchillo, colocado en la cara transversal y haciendo un corte en el sentido longitudinal, esto con el fin de obtener un corte similar al de una astilla de madera. La cantidad de astillas de cada tipo de madera fue de 135 unidades (3 árboles x 3 largos x 3 anchos x 5 muestras).

La determinación del poder calórico (PC), el porcentaje de cenizas, el porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N), la relación carbono/nitrógeno, el porcentaje de extractivos y las pruebas termogravimétricas se realizaron a través de la extracción de aserrín, resultante del proceso de aserrío de las trozas de cada una de las especies, dicho aserrín

fue tamizado en mallas de 0,25 mm y 0,42 mm, hasta obtener aproximadamente 8 gramos para cada prueba. En aquellas especies que presentaban albura y duramen se trató de hacer una combinación de 50 y 50% de cada tipo de madera.

Para el análisis de las características de combustión se utilizó la segunda troza de cada árbol. De cada troza fueron cortadas piezas de 3 cm x 3 cm x 30 cm. Luego estas fueron torneadas para obtener cilindros de 2 cm x 30 cm, siguiendo la dirección de la fibra de la madera. De cada especie fueron extraídas 65 muestras de 2 cm de diámetro y 10 cm de largo. Así mismo del material sobrante de las trozas fueron extraídas muestras de 6 cm de ancho, 5cm de largo y de 1 cm de espesor para la determinación del peso específico básico.

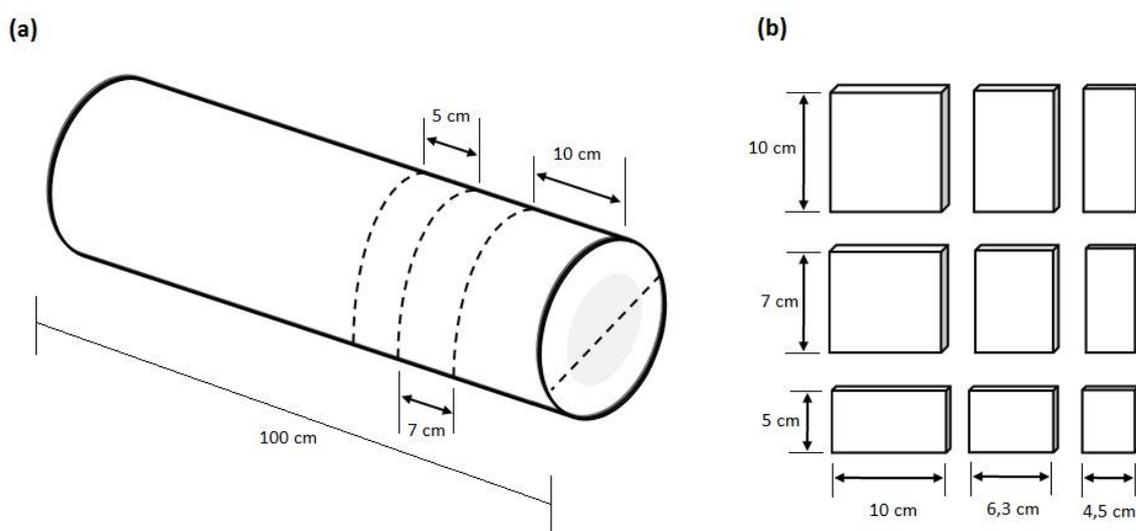


Figura 1. Patrón de corte utilizado para obtener astillas para la prueba de difusión (a), dimensiones de las astillas (b).

2.3. Características de combustión

El porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N fueron determinados mediante el uso del Elementar Analysensysteme, modelo Vario Macro Cube. También fue determinado el índice de combustibilidad (FVI) que toma como referencia el poder calórico neto, la densidad y el porcentaje de cenizas, utilizando la ecuación 1, basados en la metodología propuesta por Purohit y Nautiyal (1987).

$$\text{Índice combustibilidad} = \frac{(\text{Poder calórico} * \text{Densidad})}{\text{Porcentaje cenizas} * 100} \quad (1)$$

2.4. Determinación del poder calórico

El poder calórico (CV) fue determinado para la variación del contenido de humedad desde condición verde hasta la condición sin presencia de agua. Se utilizó el aserrín tamizado de entre 0,25 mm y 0,42 mm y fue seleccionado el tamaño de partículas colectadas entre la malla de 40 y 60 mesh. Se obtuvo aproximadamente 100 gramos de material tamizado. Luego este material fue esparcido sobre una superficie plana para que se fuera secando a temperatura ambiente, período que tardo en promedio alrededor de 15 horas para todas las especies. Durante este período, cada 30 minutos fueron extraídos aproximadamente 8 gramos de muestras, con el fin de obtener material para los diferentes contenidos de humedad y así tener la variación del PC con el contenido de humedad. Posteriormente, las muestras fueron divididas en dos partes: 1 gramo para la determinación del contenido de humedad y tres muestras de 2 gramos para la determinación del PC. El PC se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM 2003a).

2.5. Determinación del contenido de humedad en verde, peso específico y densidad

El cálculo del contenido de humedad (CH) está referido a la humedad que presenta la madera en el momento del corte, comúnmente denominado como humedad en verde. Las astillas fueron pesadas en el momento del corte y fueron colocadas por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103 °C, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM 2003b). Luego de ese período se volvía a pesar, para obtener el peso seco. Finalmente se aplicó la ecuación 2. En la determinación del peso específico básico (PE) y la densidad verde (Dv). El volumen de la astilla fue determinado por desplazamiento de volumen de agua sobre una balanza. Para el SG (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 (ASTM 2003c). Y para la Dv se utilizó la relación peso verde/volumen verde.

$$MCg = \frac{(Peso\ verde - Peso\ seco)}{Peso\ verde} \times 100 \quad (2)$$

2.6. Determinación de las propiedades químicas

Estas consistieron de determinar el contenido de cenizas, la cantidad de celulosa y lignina. En la determinación de la cantidad de cenizas se siguió la norma ASTM D-1102-84 (ASTM 2003d), en la cuantificación de lignina se utilizó el método TAPPI T222 om-02 (Tappi 2002) y en la determinación de celulosa se siguió el procedimiento seguido por Seifert (1960). En cada tipo de determinación se utilizaron 3 muestras diferentes.

2.7. Extraíbles en diferentes solventes

Las extracciones fueron determinadas en agua (caliente y temperatura ambiente), acorde con D-1110-84 (ASTM 2003e), en hidróxido de sodio (NaOH) utilizando el estándar D-

1109-84 (ASTM 2003f), en una solución de etanol-tolueno con el estándar D-1107-96 (ASTM 2003g) y en diclorometano ($\text{CH}_2\text{-Cl}_2$) usando la norma D-1108-96 (ASTM 2003h). De cada tipo de extraíbles se realizaron 3 muestras.

2.8. Análisis termogravimétrico

Las mediciones del análisis termogravimétrico (TGA) se llevaron a cabo utilizando 1 mg del aserrín de cada una de las especies tamizado entre 40 y 60 mesh, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min en una atmósfera de nitrógeno y llegando a una temperatura de 950°C en 17 minutos. Fue utilizado un Analizador Termogravimétrico modelo TGA 5000, marca Instrument NBr. En dicho análisis se proporciona la temperatura y la pérdida de masa en las diferentes temperaturas (curvas TGA), además del análisis de la relación de la masa con la temperatura, mediante las curvas DTG (Figura 2a). De dichas curvas se deriva: (i) la temperatura de inicio de la descomposición (T_i) y al porcentaje de masa remanente al punto de inicio de la descomposición (W_{ti}), estos valores corresponden a la primera gradiente en la curva del análisis TGA. (ii) la temperatura de deflexión antes del punto de máxima descomposición (T_{sh}) y a la masa remanente a este punto (W_{tsh}), en este caso, este punto solo fue visible para *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. (iii) la temperatura correspondiente al punto de máxima descomposición (T_m), y masa remanente a este punto (W_{tm}) y (iv) el punto de temperatura y masa a consumir al final de la descomposición (T_f y W_{tf}), corresponden al punto en que la pérdida de masa comienza a estabilizarse al aumentar la temperatura.

El consumo eléctrico, medido en kilovatios por hora (kwh), fue determinado para: (i) el gasto energético de transformación del material, (ii) el gasto energético del transporte del material y (iii) el gasto energético del secado. Cada uno de estos gastos se detalla a continuación:

2.9. Análisis de quemado

La primera parte de esta prueba, consistió en acondicionar las 60 muestras cilíndricas a CH de 100%, 80%, 60%, 40%, 20% y 0%, 10 muestras por cada MC. En el caso de las especies *G. arborea* (en albura), *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga* no fue posible tener las muestras en los MC de 80% y 100%, ya que para estas especies el contenido de humedad máximo fue de 68%, 72%, 71% y 59% respectivamente. Para lograr el acondicionamiento, con la determinación del contenido de humedad verde, fue calculado el peso al CH deseado y de forma tal que la muestra se secará hasta obtener el peso deseado. La segunda parte consistió en hacer el análisis de quemado. Para ello se construyó un sistema cilíndrico de calentamiento, de 10 cm de diámetro, con resistencias de 1000 watts, basado en el diseño presentado por Castro y Costa (2007). Este sistema de calentamiento fue rodeado por un cilindro de hierro de 25 cm de diámetro, para evitar pérdidas de calor. Durante la prueba de quemado la muestra cilíndrica es colocada en un soporte debajo del sistema de calentamiento sobre una balanza debidamente protegida del calor con una precisión de 0.01 g. El detalle y funcionamiento de este sistema de quemado puede ser consultado en Castro et al. (2007). La prueba de quemado consistía en que cuando la parte interna del cilindro presentaba una temperatura de 450 °C, se

colocaba la muestra cilíndrica y se cubría para que iniciara el proceso de combustión. Al colocar la muestra se cronometró el tiempo y se tomó el peso en intervalos de 1 minuto hasta que el peso de la muestra alcanzara un peso más o menos constante.

Con los datos de peso y tiempo fue calculada la pérdida de masa (porcentaje) con el tiempo para cada contenido de humedad, y para cada especie, así mismo fue graficado este comportamiento. En el caso de *T. grandis* se hizo el análisis para los dos tipos de madera que presentaban (albura y duramen). Posteriormente, fue calculada la pérdida de masa en cada intervalo de tiempo (dm/dt) y graficado este valor en relación al tiempo. En este último grafico se observan visualmente las diferentes etapas de quemado (Figura 2b): inicio de pirólisis, ignición, fin de llama e inicio de incandescencia (Castro et al. 2007). Al identificar estas etapas se establece el consumo de masa por cada etapa. En *G. arborea* y *V. guatemalensis* no fue posible establecer las diferentes etapas de la combustión para contenidos de humedad mayores a 20%, ya que no se establecía un comportamiento definido en cada etapa. Por otro lado, aunque *T. grandis* presentaba albura y duramen para comparar con las otras especies se utilizaron los valores del duramen.

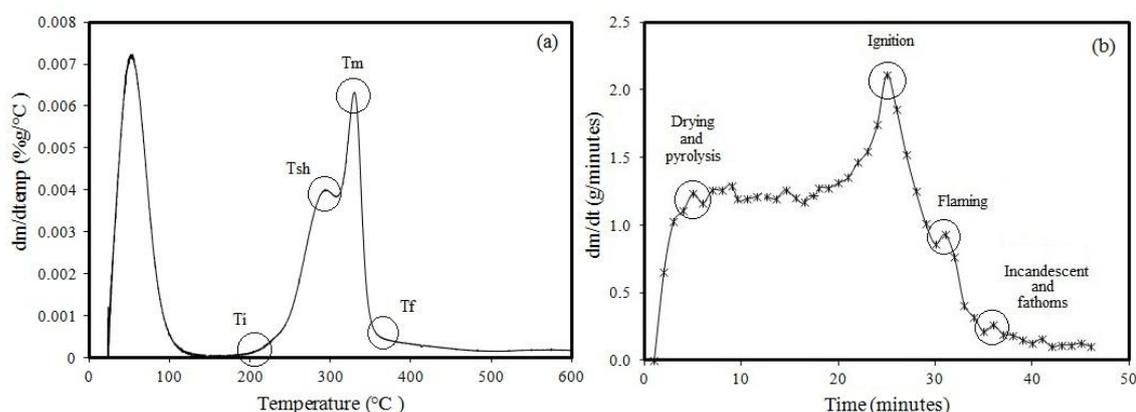


Figura 2. Puntos donde ocurren las etapas del proceso de degradación de la madera por TGA para *A. acuminata* (a) y del proceso de quemado para un cilindro de *T. oblonga* a 60% de CH (b).

2.10. Difusión de la humedad

Las astillas obtenidas en el muestreo (Figura 1b), fueron pesadas para determinar su peso verde o inicial, y posteriormente se colocaron dentro de un horno a temperatura de 75 °C, y fueron pesadas cada 60 minutos o cada 30 minutos, hasta obtener un peso constante. El primer rango de tiempo para especies sobre 100% de humedad y el período más corto para las especies con humedad inferior a 100%. Una vez obtenido este peso constante, el horno se programó a un temperatura de 103°C durante aproximadamente 12 horas para obtener el peso seco al horno. El coeficiente de difusión fue calculado a 15% y utilizando la ecuación 3.

$$D = \frac{E_t^2 * \pi}{16 * t * L^2} \quad (3)$$

Donde: L es la longitud de la muestra en la dirección de transporte del agua (mm), t es el tiempo de secado (s) y E_t es el cambio relativo en el contenido de humedad de la madera de verde a seco (15% CH).

2.11. Análisis estadísticos

Se desarrollo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para PC, FVI, CH, las propiedades químicas, los extractivos, las variables del TGA (temperatura y masa de inicio de descomposición, temperatura y masa correspondiente antes de la máxima descomposición, la temperatura y masa en la máxima pérdida de masa, y a la temperatura y masa del final de la descomposición) y para D por dimensión de astilla y especie. Además, se verificó si las variables cumplían con los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos.

El procedimiento GLM de SAS (SAS Institute 1997) fue aplicado para estimar la significancia de la especie como única fuente de variación del modelo. La existencia de diferencias significativas entre los promedio del PC máximo y verde, del CH, D_v , porcentaje de cenizas, carbono, nitrógeno, la relación C/N, los extractivos, lignina y celulosa, fue verificado mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Además, se realizó un análisis de regresión en orden de establecer la relación entre el CH y el PC, del tipo $PC = \beta_0 + \beta_1 CH$. Se realizó un análisis de correlación entre el PC, FVI y la gradiente de la curva (β_0) y las características físicas, químicas y los extractivos.

Para el análisis de TGA y quemado, se verificó la existencia de diferencias significativas entre los promedios de las variables del TGA mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Se llevó a cabo un análisis de correlación entre los parámetros del TGA (T_i , T_{sh} , T_m , T_f , W_{ti} , W_{tsh} , W_{tm} , W_{tf}), como variables dependientes, y el poder calórico, contenido de cenizas, el porcentaje de carbono, nitrógeno, celulosa y lignina, y los extractivos, como variables independientes.

En el análisis de difusión, se graficó la variación del CH en relación al tiempo. En dicha relación el valor de CH se transformó al logaritmo natural y el tiempo se mantuvo sin transformar. Fue usada dicha transformación con el fin de visualizar mejor las diferencias entre las diferentes dimensiones de la astillas. Posteriormente se llevo a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para establecer la diferencia en los D de cada dimensión de astilla en cada una de las especies. Las diferencias entre medias se llevaron a cabo por el test de rango múltiple de Tukey con una significancia de valor de $P < 0,05$. Así mismo se llevó a cabo un análisis de correlación entre el D , como variable dependiente, y el CH y PE, como variables independientes.

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros calorimétricos

Los parámetros energéticos son mostrados en la figura 3. En el caso del PC máximo (PC a 0% de CH) los valores variaron de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen (Figura 3a). *B. quinata*, *A. mangium*, *G. arborea* y *A. acuminata* presentan los valores más altos en albura, en tanto *G. arborea* y *S. macrophylla* presentan los valores más altos en el duramen. En las especies que se presentan albura y duramen no hay una consistencia en cual tipo de madera presenta mayor PC. *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor PC que la madera de duramen. Por el contrario, *C. lusitanica* y *S. macrophylla*, el duramen presenta PC que la madera de albura, En tanto que en *G. arborea* no se presenta diferencia en los dos tipos de madera (Figura 3a). En el caso del índice de combustibilidad (FVI), se presentan grandes variaciones entre las especies (Figura 3b). *C. lusitanica* (6390) posee un valor muy superior al resto de las especies. Posteriormente se presenta un grupo de especies con valores próximos a 3000, compuesta por *T. amazonia*, *S. macrophylla*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *T. grandis*. Finalmente, 4 especies (*G. arborea*, *T. oblonga*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*) presentan FVI bajos.

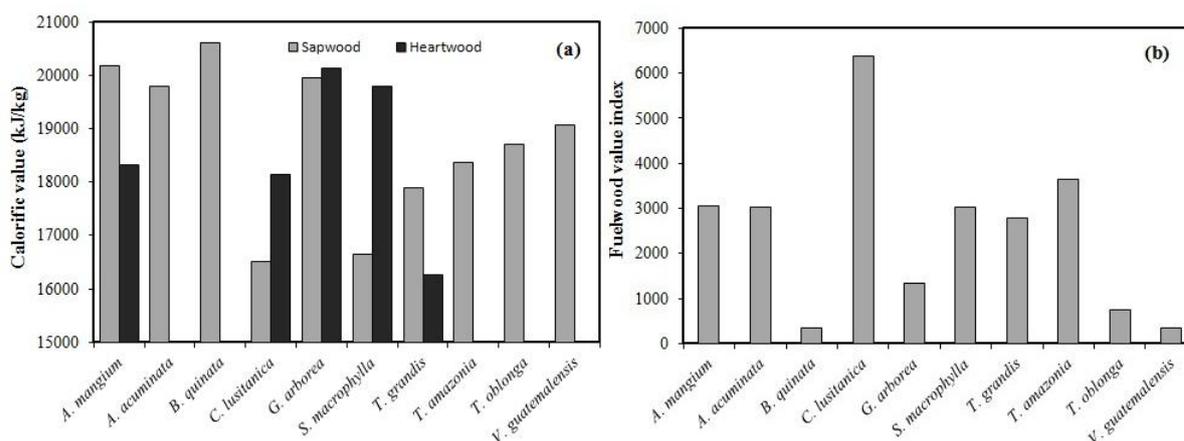


Figura 3. Poder calórico máximo (a) e índice de combustibilidad (b) para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones en Costa Rica.

El rango de variación (16500 a 20594 kJ/kg) encontrado en PC máximo de las 10 especies plantación de rápido crecimiento de Costa Rica (Figura 3a) concuerda con los valores encontrados para otras especies tropicales, pero creciendo en la India (Kumar et al. 2011, Kataki y Konwer 2002). Así mismo en las especies que se presentan albura y duramen, la falta de consistencia de cuál de estos dos tipos de madera presenta mayor PC, también ha sido señalado por otros autores (Shanavas y Kumar 2003, White 1987, Kataki y Konwer 2001). Dichos autores encontraron que en algunas especies la albura presenta mayor PC que el duramen, pero para otras especies fue contrario, la madera de duramen presento un PC más alto. Resultados similares a los obtenidos en el presente estudio, donde en *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor PC que la madera de duramen, pero en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *S. macrophylla*, el duramen presenta mayor PC que la albura (Figura 3a).

3.2. Variación del poder calórico con el contenido de humedad

La figura 4, muestra el comportamiento del PC por la variación del CH en las 10 especies, tanto para albura como para duramen, en las especies que poseen ambos tipos de madera. Como era de esperar el comportamiento del PC fue inversamente proporcional con el incremento del CH. En las especies que presentan tanto madera de albura como de duramen no hay una tendencia clara para decir que un tipo de madera presenta mayor PC que otro. En *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *G. arborea* se observa que la madera de duramen posee valores de PC más altos en comparación con la madera de albura (Figuras 4d, e, f). *A. mangium* tiene un comportamiento similar, pero en CH menores a 10%, la albura posee valores de PC mayores al duramen (Figura 4a). El caso de *T. grandis* es contrario a los anteriores, el duramen posee valores de PC más bajos que la albura (Figura 4g).

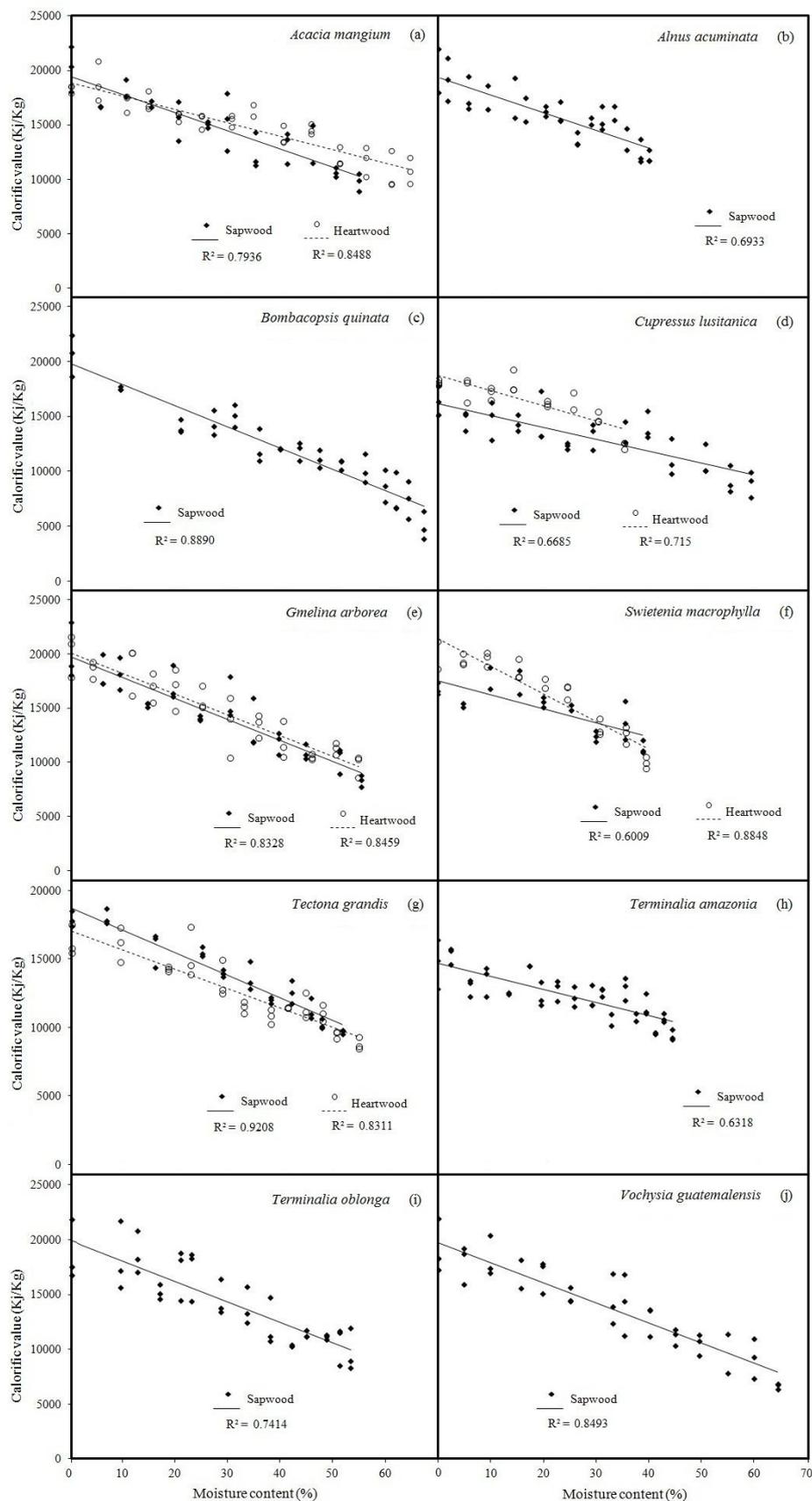


Figura 4. Poder calórico de acuerdo al contenido de humedad para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

Para las 10 especies, se encontró que el poder calórico puede ser modelado con respecto a la disminución del MCg por una relación lineal de tipo $PC = \beta_0 \cdot CH + \beta_1$. En la tabla 2, se muestran los diferentes coeficientes del modelo, los coeficientes de determinación (R^2) y su significancia para las 10 especies y según el tipo de madera. Los R^2 más bajos se encontraron en la madera de albura de *T. amazonia* (0.63), *C. lusitanica* (0.67) y *A. acuminata* (0.69). La albura de *T. grandis* presenta el R^2 más alto con 0.92, seguida de *B. quinata* con 0.89. El intercepto de las ecuaciones (β_0), en este modelo representa el valor estimado del PC a un CH de 0% y sus valores varían de 17040 a 21301 kJ/kg en el duramen, y de 16194 a 19899 kJ/kg en la albura. En este caso *S. macrophylla* y *G. arborea* presentan los valores más altos, con 21301 y 20078 kJ/kg, respectivamente ambas en el duramen. Los valores más bajos los presenta la albura de *C. lusitanica* (16194 kJ/kg) y el duramen de *T. grandis* (17040 kJ/kg). La pendiente de la ecuación representa como cambia el PC según el cambio de 1% en el CH. Un valor negativo significa que la relación existente entre el PC y el CH es negativa o inversa. *S. macrophylla* (-253.53 kJ/% CH) es la especie que pierde mayor PC conforme aumenta en 1% en CH. Por el contrario *C. lusitanica* es la especie que menos PC pierde al aumentar el CH, con -109.17 kJ/% CH. El resto de las especies se encuentran en el rango de -194.35 a -118.87 kJ/% CH.

Tabla 2. Parámetros estadísticos del análisis de regresión lineal ($y = \beta_0^* CH + \beta_1$) entre el poder calórico y el contenido de humedad para albura y duramen para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

Especie	Tipo de madera	Coeficientes del modelo		Valor F	R ²
		b ₁	b ₀		
<i>Acacia mangium</i>	Albura	19417.00	-168.51	119.16	0.79
	Duramen	18870.00	-124.72	218.85	0.85
<i>Alnus acuminata</i>	Albura	19192.00	-160.71	81.40	0.69
<i>Bombacopsis quinata</i>	Albura	19816.00	-194.35	344.35	0.89
<i>Cupressus lusitánica</i>	Albura	16193.78	-109.17	75.59	0.67
	Duramen	18801.11	-139.64	52.68	0.71
<i>Gmelina arborea</i>	Albura	19698.00	-193.44	169.34	0.83
	Duramen	20078.00	-191.81	186.66	0.85
<i>Swietenia macrophylla</i>	Albura	17458.00	-129.92	31.62	0.60
	Duramen	21301.00	-253.53	176.59	0.88
<i>Tectona grandis</i>	Albura	18706.00	-165.99	360.48	0.92
	Duramen	17040.00	-142.03	167.33	0.83
<i>Terminalia amazonia</i>	Albura	18395.00	-118.87	80.67	0.63
<i>Terminalia oblonga</i>	Albura	19899.00	-186.84	111.79	0.74
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Albura	19636.00	-182.51	214.10	0.84

Algunos estudios, como los llevados a cabo por Singh and Khanduja (1984) y Goel y Belh (1996) señalan que las especies de alto PE y alto Dv poseen los valores PC más altos, y además presentan un lento quemado, haciéndolas más deseables como combustibles. Pero la capacidad de combustión que posee una especie también depende de su CH (Senelwa y Sims 1999, Jain 1993, Jain y Singh 1999), sobre todo porque un alto valor de CH hace menos eficiente a la madera como combustible, debido a que el valor del poder calórico neto es reducido. Sin embargo, en el presente estudio se encontró que tanto el PE como la Dv no fueron correlacionados con ninguno de los parámetros energéticos evaluados (Tabla 5). Este resultado sugiere que los parámetros energéticos de las especies de reforestación estudiadas están influenciados por otras características de la madera.

La figura 2 muestra claramente el efecto lineal ($y = \beta_0^* CH + \beta_1$) del CH en el PC, donde se observan claramente los beneficios que posee el secado de la biomasa antes de su combustión. Así mismo esto coincide con otros estudios llevados a cabo en *Pinus radiata* and *Eucaliptus nites* (Senelwa y Sims, 1999). La humedad no contribuye al PC, pero reduce el calor disponible para combustión, al respecto Senelwa y Sims (1999) señalan 3 aspectos importantes: (i) reduce el PC inicial de la madera, (ii) reduce la eficiencia de la

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento”

combustión ya que el calor se absorbe en la evaporación de agua en las etapas iniciales de combustión, lo que reduce tanto la temperatura de la llama como la transferencia de calor y (iii) por el efecto de hidrólisis en el agua caliente.

3.3. Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas obtenidas para las 10 especies son mostradas en la tabla 3. En relación a las propiedades físicas se encontró que: (i) la variación de la Dv fue de 0.67 a 1.12 g/cm³ y este rango se puede separar en especies con densidades sin diferencia estadística. Un primer grupo, con Dv mayor a 1 g/cm³ es compuesto por *T. grandis* y *A. mangium*. Un segundo grupo compuesto por especies con valores estadísticamente menores al primer grupo, de 0.91 a 0.95 g/cm³, compuesto por *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*. El tercer grupo lo componen *T. amazonia* y *B. quinata*, con 0.87 y 0.86 g/cm³ respectivamente. *C. lusitanica* y *V. guatemalensis* componen el cuarto grupo ambas con 0.75 g/cm³. Finalmente *A. acuminata* con 0.67 g/cm³, valor estadísticamente diferente a todos los anteriores. (ii) En el PE se presentó una variación de 0.26 a 0.60. El análisis de medias mostró que solamente en *A. mangium* (0.37) y *A. acuminata* (0.36) los valores no presentaron diferencias estadísticas. A diferencia del resto de la especies que se presentó valores de PE estadísticamente diferentes (valor p <0.05) entre ellos (Tabla 3). (iii) En el CH, se encontró en el análisis estadístico que los valores más altos se presentaron en *A. mangium* y *V. guatemalensis* y la especie con menor CH se presentó *T. oblonga*. Seguidamente *G. arborea* y *T. grandis* presentaron CH con valores intermedios (entre 41.81% y 63.34%) y luego de ellas, con valores de CH estadísticamente menores *S. macrophylla* y *T. amazonia*. En tanto que el resto de las especies son diferentes entre ellas y con los grupos anteriores.

En tanto que en la composición química se determinó que: (i) *B. quinata* y *V. guatemalensis* presentan los porcentajes de cenizas más altos, pero con diferencias estadísticas entre ellos, mientras que *C. lusitanica*, *A. acuminata* y *T. amazonia* (0.41%) presentan los valores estadísticamente más bajos. El resto de las especies presentan diferencias estadísticas entre ellas, con valores que van de 0.58% a 2.81% (ii) En relación con el porcentaje de C se encontró que *C. lusitanica* y *T. grandis* presentan los porcentajes más altos, posteriormente, y con menor contenido de C, se presentan 4 especies (*A. mangium*, *B. quinata*, *G. arborea* y *S. macrophylla*). Seguidamente *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga*, forman un tercer grupo. Finalmente *V. guatemalensis* presenta el contenido de C más bajo y es estadísticamente diferente al resto de las especies (Tabla 3). (iii) El porcentaje de N, fue el parámetro donde se presentaron la menor cantidad diferencias estadísticas entre especies (Tabla 3). Un grupo con valores entre 0,27% a 0,34%, lo conforman *V. guatemalensis*, *T. oblonga*, *A. acuminata*, *C. lusitanica* y *T. amazonia*. Otro grupo, con contenidos de N menores a 0,26%, es formado por *B. quinata* y *S. macrophylla*. Finalmente *G. arborea* y *T. grandis*, presentan los porcentajes estadísticamente más bajos de N con 0.20%. (iv) La relación C/N presenta valores que varían de 138.49 a 249.79. Las especies se concentraron en 2 grupos, el primer grupo corresponde a las especies de valores más altos de 185.56 a 249.79 que incluye a *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla*, *B. quinata* y *C. lusitánica* y un segundo grupo va de 138.49 a 185.56 que incluye al resto de las especies. (v) El porcentaje de celulosa varió de 40.07% a 49.58%. El análisis estadístico mostro que *B.*

quinata, *A. mangium* y *G. arborea* son las especies con los porcentajes de celulosa mayores a 47.41%. Un segundo grupo con valores que van de 43.83% a 46.00% es compuesto por las especies *V. guatemalensis*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *C. lusitanica*. *A. acuminata*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, presentan los valores estadísticamente más bajos entre 40.07% a 43.19%. (vi) Finalmente, el contenido de lignina presentó valores que van de 21.95% a 48.39% (Tabla 3). *V. guatemalensis* y *C. lusitanica* presentaron los valores estadísticamente más altos con 48.39% y 46.77% respectivamente. Un segundo grupo de especies compuesto por *B. quinata* y *T. oblonga* presentaron un contenido de lignina de 39.92% y 38.31%, seguidas de *A. acuminata*, *A. mangium*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* con valores que varían de 30.96% a 33.01%. Finalmente, los porcentajes estadísticamente más bajos son para *T. grandis* con 21.95% y *G. arborea* con 24.20%.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Densidad verde (g/cm ³)	Peso específico básico	Contenido de humedad verde (%)	Cenizas (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación Carbono-Nitrógeno	Celulosa (%)	Lignina (%)
<i>Acacia mangium</i>	1.08 ^B (0.04)	0.37 ^G (0.06)	66.72 ^A (4.89)	0.58 ^{EF} (0.09)	48.48 ^B (0.12)	0.28 ^{AB} (0.04)	175.20 ^B (24.03)	49.31 ^{AB} (2.00)	31.43 ^D (3.80)
<i>Alnus acuminata</i>	0.67 ^G (0.07)	0.36 ^G (0.04)	46.48 ^D (1.79)	0.38 ^{FG} (0.06)	47.74 ^C (0.09)	0.30 ^{AB} (0.01)	159.70 ^B (8.04)	43.19 ^{DE} (1.37)	33.01 ^{CD} (1.79)
<i>Bombacopsis quinata</i>	0.86 ^E (0.05)	0.32 ^H (0.04)	63.34 ^B (4.45)	3.99 ^A (0.51)	48.68 ^B (0.10)	0.26 ^{BC} (0.02)	187.97 ^{AB} (14.40)	49.58 ^A (3.80)	39.92 ^B (1.44)
<i>Cupressus lusitanica</i>	0.75 ^F (0.07)	0.42 ^F (0.04)	44.50 ^E (7.31)	0.19 ^G (0.04)	50.18 ^A (0.21)	0.27 ^{ABC} (0.01)	185.56 ^{AB} (10.25)	46.00 ^{BCD} (1.53)	46.77 ^A (1.76)
<i>Gmelina arborea</i>	0.91 ^D (0.14)	0.39 ^F (0.04)	56.97 ^C (5.90)	0.96 ^E (0.08)	48.39 ^B (0.14)	0.20 ^C (0.05)	249.79 ^A (74.39)	47.41 ^{ABC} (1.48)	24.20 ^E (1.66)
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.94 ^{CD} (0.04)	0.54 ^B (0.03)	41.81 ^F (2.73)	0.64 ^{EF} (0.04)	48.75 ^B (0.25)	0.24 ^{BC} (0.00)	199.53 ^{AB} (3.09)	43.15 ^{DE} (0.88)	30.96 ^D (2.28)
<i>Tectona grandis</i>	1.12 ^A (0.02)	0.49 ^D (0.04)	56.43 ^C (3.82)	2.81 ^C (0.13)	49.77 ^A (0.15)	0.20 ^C (0.01)	249.11 ^A (16.21)	44.45 ^{CD} (0.78)	21.95 ^E (2.58)
<i>Terminalia amazonia</i>	0.87 ^E (0.08)	0.51 ^C (0.04)	41.66 ^F (2.07)	0.41 ^{FG} (0.07)	47.83 ^C (0.18)	0.27 ^{ABC} (0.02)	176.84 ^B (10.98)	45.81 ^{BCD} (1.64)	31.36 ^D (1.20)
<i>Terminalia oblonga</i>	0.95 ^C (0.07)	0.60 ^A (0.07)	37.16 ^G (3.62)	1.84 ^D (0.07)	47.69 ^C (0.28)	0.31 ^{AB} (0.05)	154.86 ^B (20.56)	40.07 ^E (1.45)	38.31 ^{BC} (2.18)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	0.75 ^F (0.08)	0.26 ^I (0.03)	65.32 ^A (2.29)	3.47 ^B (0.46)	46.38 ^D (0.06)	0.34 ^A (0.04)	138.49 ^B (15.08)	43.83 ^D (2.09)	48.39 ^A (6.54)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

3.4. Cantidad de extraíbles

La tabla 4 presenta el porcentaje de extraíbles en diferentes tipos de solventes para las 10 especies y se encontró que: (i) para los extraíbles en hidróxido de sodio, el análisis estadístico mostro que las especies de mayor valor (mayor a 22.40%) son *G. arborea*, *T. grandis* y *T. amazonia*. Un segundo grupo compuesto por *S. macrophylla*, *V. guatemalensis* y *T. oblonga* presenta valores entre 19.02% a 21.18%. Un tercer grupo,

con el porcentaje de extraíbles más bajos, menor a 13,21%, lo conforman *A. mangium*, *C. lusitanica* y *B. quinata*. (ii) para los extraíbles en agua caliente, se encontró que los mayores porcentajes (mayor a 11.21%) se presentan *T. amazonia* y *T. oblonga*. En tanto que *A. acuminata* y *A. mangium*, poseen los valores más bajos, menor a 2.45%. El resto de las especies que se ubican entre el rango de 6.16% a 10.02% y no presentan diferencias estadísticas entre ellas. (iii) para los extraíbles en agua fría, el análisis estadístico agrupó las especies en dos, el primer grupo lo componen *G. arborea*, *T. grandis*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia* y *S. macrophylla*, con valores mayores a 11.33%, el segundo grupo está compuesto *C. lusitanica*, *B. quinata*, *A. acuminata* y *A. mangium* y presenta porcentajes de extraíbles menores a 8.22%. En el caso de *T. oblonga* esta especie (10.04%) forma parte de ambos grupos. (iv) el análisis de los extraíbles en Diclorometano, permite separar 3 grupos de especies, el primero formado por *C. lusitanica*, *A. mangium*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*, con los mayores porcentajes. El segundo formado por *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla* y *A. acuminata*, especies con valores intermedios de 1.27% a 2.20%. Finalmente las especies con menor porcentaje de extraíbles fueron *T. oblonga* y *T. amazonia*. (v) para los porcentaje de extraíbles en etanol-tolueno no se presentó ninguna diferencia estadística (valor $p < 0.05$) entre las especies y los valores variaron de 0.95% (*A. mangium*) a 3.87% (*S. macrophylla*).

Tabla 4. Análisis de extractivos para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Extractivos (%) solubles en:				
	Hidróxido de sodio (al 1%)	Agua caliente	Agua fría	Diclorometano	Etanol-Tolueno
<i>Acacia mangium</i>	13.21 ^{EF} (1.17)	2.45 ^D (0.87)	2.00 ^D (0.93)	3.25 ^{AB} (1.14)	0.95 ^A (0.43)
<i>Alnus acuminata</i>	16.31 ^{DE} (1.76)	2.74 ^D (0.46)	2.32 ^{BD} (0.65)	1.27 ^{BC} (0.49)	1.05 ^A (0.56)
<i>Bombacopsis quinata</i>	11.08 ^F (0.49)	6.16 ^{CD} (1.50)	6.80 ^{BD} (0.49)	2.52 ^{ABC} (0.73)	1.26 ^A (0.61)
<i>Cupressus lusitanica</i>	11.84 ^F (0.51)	8.01 ^{BC} (1.27)	8.22 ^{BD} (1.03)	4.61 ^A (1.69)	2.21 ^A (0.99)
<i>Gmelina arborea</i>	26.13 ^A (0.56)	7.81 ^{BC} (0.15)	14.17 ^A (0.08)	2.21 ^{BC} (0.12)	0.82 ^A (0.49)
<i>Swietenia macrophylla</i>	21.18 ^{BC} (0.71)	9.65 ^{BC} (1.81)	11.33 ^{AC} (1.59)	1.49 ^{BC} (0.75)	3.87 ^A (1.85)
<i>Tectona grandis</i>	23.82 ^{AB} (1.17)	7.22 ^{BC} (0.87)	13.01 ^A (0.93)	2.20 ^{BC} (0.08)	1.18 ^A (0.00)
<i>Terminalia amazonia</i>	22.40 ^{ABC} (1.06)	15.28 ^A (1.62)	11.72 ^A (1.18)	1.04 ^C (0.67)	3.38 ^A (0.12)
<i>Terminalia oblonga</i>	19.02 ^{CD} (2.81)	11.21 ^{AB} (2.82)	10.04 ^{BC} (1.07)	1.05 ^C (0.38)	2.87 ^A (0.81)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	20.99 ^{BC} (3.97)	10.02 ^{BC} (1.68)	11.95 ^A (1.21)	2.91 ^{ABC} (1.29)	2.84 ^A (1.57)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento”

3.5. Efecto de las propiedades físicas y químicas y del contenido de extraíbles en los parámetros energéticos.

Para el duramen el contenido de C y la cantidad de cenizas afectaron negativamente el PC máximo y la cantidad de N, lignina y los extraíbles en diclorometano afectaron positivamente y significativamente el PC verde (PC al máximo CH de la madera), en tanto que la cantidad de cenizas afecto negativamente y significativamente el PC verde (Tabla 5). En tanto que la albura, presente en todas las especies, el poder calórico fue menos afectado. El PC máximo fue afectado significativamente por la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno, en tanto que la cantidad de cenizas afectó el PC verde.

El FVI fue el más afectado por los parámetros químicos o extractivos en la madera. La cantidad de carbono y los extraíbles en NaOH afectaron positivamente este valor, en tanto que los extraíbles en NaOH y diclorometano afectaron negativamente el FVI. Finalmente los gradientes (β_0) en los modelos de variación del poder calórico con la disminución del CH, fue encontrado que los extraíbles en agua caliente y etanol-tolueno afectan negativamente estos gradientes en el caso de la madera de duramen, pero en la madera de albura este parámetro fue afectado solamente por el contenido de cenizas (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre los parámetros energéticos y los componentes químicos y extraíbles en diferentes solventes para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Características	Duramen			Albura			FVI	
	CV máximo	CV verde	B ₀	CV máximo	CV verde	B ₀		
Densidad verde	-0.46	-0.74	0.20	0.47	0.31	-0.59	-0.60	
Peso específico básico	-0.10	-0.42	-0.64	-0.72	0.76	0.41	-0.00	
Carbono	-0.68*	0.35	0.40	-0.45	0.06	0.41	0.77**	
Nitrógeno	0.03	0.80**	0.31	0.15	-0.07	-0.05	0.65	
Relación C/N	-0.10	-0.75	-0.16	-0.11	0.00	-0.05	-0.62	
Cenizas	-0.67*	-0.80**	0.17	0.34	-0.78**	-0.65**	-0.41	
Celulosa	0.10	0.32	0.61	0.45	-0.44	-0.10	-0.11	
Lignina	0.06	0.96**	0.19	-0.11	-0.45	0.10	0.92**	
Extraíbles en	NaOH	0.18	-0.86*	-0.50	-0.15	0.28	-0.10	-0.80**
	Agua caliente	0.28	-0.12	-0.71*	-0.45	0.11	0.32	0.09
	Agua fría	0.13	-0.55	-0.52	-0.39	-0.12	-0.01	-0.38
	Diclorometano	-0.27	0.88**	0.70*	-0.14	-0.48	0.15	0.81**
	Etanol-Tolueno	0.32	0.17	-0.72*	-0.64**	0.28	0.51	0.33

Nota: * parámetro estadísticamente significativo al 95% y ** parámetro estadísticamente significativo al 99%. PC máximo = poder calórico a 0% de CH, PC verde = poder calórico al máximo CH de la madera.

Los diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del PC con la disminución del CH encontrados entre la albura y el duramen en las especies con estos dos tipos de madera (*C. lusitanica* and *S. macrophylla* el gradiente de la pendientes es mayor en el duramen, pero en *A. mangium* and *T. grandis* la pérdida de calor es mayor en la albura, en tanto que *G. arborea* no hay diferencia en los dos tipos de tejidos), indican que la influencia del CH en el PC es diferente en cada tipo de madera, por lo que probablemente diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo o bien los extractivos de la madera están influyendo en esta variación. De hecho, los efectos de los componentes químicos o extractos en la madera afectaron de diferente forma los dos tipos de madera. En el caso del duramen, la gradiente de la pendiente (β_0) fue afectado solamente por los extractos en agua caliente, diclorometano y etanol-tolueno, pero en el caso de la albura solamente fue afectado significativamente por el porcentaje de cenizas (Tabla 5).

Las diferentes especies, como sucedió en la albura y duramen, también presentaron diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del PC con la disminución del CH en la parte de la albura. Confirmando nuevamente que la influencia del CH en el PC es diferente para cada especie, por lo que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo producto de los constituyentes químicos o extractivos en la madera. En el caso de la albura, que estuvo presente en todas las especies, el PC verde fue afectado negativamente por el contenido de cenizas (Tabla 5). Para la albura, las especies *B. quinata*, *G. arborea*, *T. oblonga* y *V. guatemalensis*, con la característica de presentar alto contenido de cenizas, produjeron los gradientes más bajos (de -182 a -194), en tanto que un grupo de especies conformado por *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. amazonia*, con bajos niveles de cenizas (Tabla 2) presentaron los gradientes más altos (de -109 a -123). Dichos resultados muestran el efecto negativamente significativo encontrado del contenido de cenizas y los gradientes de cambio del PC con la disminución de la humedad (Tabla 5).

El contenido de cenizas en la madera es una característica importante que afecta de igual forma la capacidad de combustión. Una alta cantidad de cenizas en madera la hace menos deseable como combustible (Kumar et al. 2010, Kumar et al. 2009, Katakai y Konwer 2002, Jain y Singh 1999). El análisis de correlación (Tabla 5) confirmó este comportamiento en las especies utilizadas en el presente estudio. El porcentaje de cenizas fue negativamente significativo el PC máximo como en el CH verde, cuando el duramen está presente en los árboles. Pero en el caso de que los árboles produzcan solo albura el efecto del contenido de cenizas desaparece en el PC máximo (Tabla 5), probablemente por la carencia de extractivos en este tipo de madera.

En el análisis de los efectos de la composición química sobre las propiedades energéticas de las especies estudiadas se encontró poca congruencia entre los efectos sobre la madera de albura y la de duramen (Tabla 5). Kumar et al. (2009) señala que existe relación entre el porcentaje de C y el PC máximo de una especie, sin embargo dicha relación solamente fue comprobada en la madera de duramen y no en la albura. Así mismo el contenido de carbono no presentó efectos en el PC verde en ambos tipos de madera (Tabla 5). Los resultados anteriores indican que el C presente en los extractivos produce estos efectos en los valores de PC del duramen y que en el caso del

PC verde el efecto del C pasa a un segundo plano, probablemente influenciado por la humedad de la madera.

Se ha señalado que la celulosa posee un contenido de calor relativamente bajo, debido a sus altos niveles de oxidación, mientras que la lignina posee bajos niveles de oxidación y por lo tanto un alto contenido de calor para combustión (Kumar et al. 1992). Sin embargo, en el estudio de las especies de rápido crecimiento de Costa Rica fue encontrado que solamente la lignina fue positivamente relacionada con PC verde y el FVI de las especies con duramen y que la celulosa no presentó ningún tipo de efecto con el PC (Tabla 5). Por tanto, otros factores, como los extractivos solubles en solventes orgánicos e inorgánicos pueden estar influyendo en el PC y disminuir los efectos de la celulosa o lignina.

En general se ha señalado que los extractivos aumentan la capacidad de combustión de la biomasa (White 1987, Demirbas 2009, Demirbas y Demirbas 2009). Sin embargo, en el presente estudio se encontró que los parámetros de combustión fueron poco afectados por la presencia de extractivos. En el caso del duramen, el CV verde se vio afectado positivamente por los extractos en diclorometano, pero negativamente en NaOH (Tabla 5). En la albura, los extractos en etanol-tolueno afectaron negativamente el CV máximo. Al respecto Senelwa y Sims (1999) señalan que la falta de correlación entre extractivos y algunos parámetros energéticos (PC y FVI) puede ser debido a la naturaleza de los componentes y a las relativas pocas cantidades presentes en la combustión.

3.6. Análisis termogravimétrico (TGA y DTG)

La figura 5 presenta las curvas de TGA y DTG para las 10 especies, estas fueron agrupadas en base a la similitud de su comportamiento en el DTG. Las especies con marcados puntos de Tsh se concentran en dos grupos. El primero conformado por *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*, en las cuales se presenta un comportamiento muy similar hasta el final de la descomposición, posterior a esto se comienzan a notar diferencias entre ellas, especialmente entre *A. acuminata*, *T. amazonia* y el resto de las especies (Figura 2a). El segundo grupo está formado por *A. mangium*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* las cuales presentan una mayor variación desde el punto de inicio de la descomposición (Figura 5b). *B. quinata* y *G. arborea* tienen un comportamiento similar en el TGA, pero diferente al de *A. mangium* y *V. guatemalensis*, que son similares entre sí.

Las figuras de DTG (Figura 5c y 5d) de todas las especies presentan 2 picos máximos, el primero que se ubica por debajo de los 100°C, y el segundo que corresponde a Tm. Para el grupo formado *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* (Figura 5c) antes de llegar al Tm, se presenta un punto de inflexión o “montura”, denominado como Tsh. Además se observan pocas diferencias entre las especies, a excepción de *A. acuminata* que posee un Tsh mucho más marcado que el resto. En el caso de las especies del segundo grupo, formado por *A. mangium*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* (Figura 2d) no se evidencia en forma clara la inflexión o Tsh. Para *B. quinata*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*, no se presenta punto de Tsh. Además *B. quinata* y *G. arborea* presentaron la Tm más baja de las 10 especies.

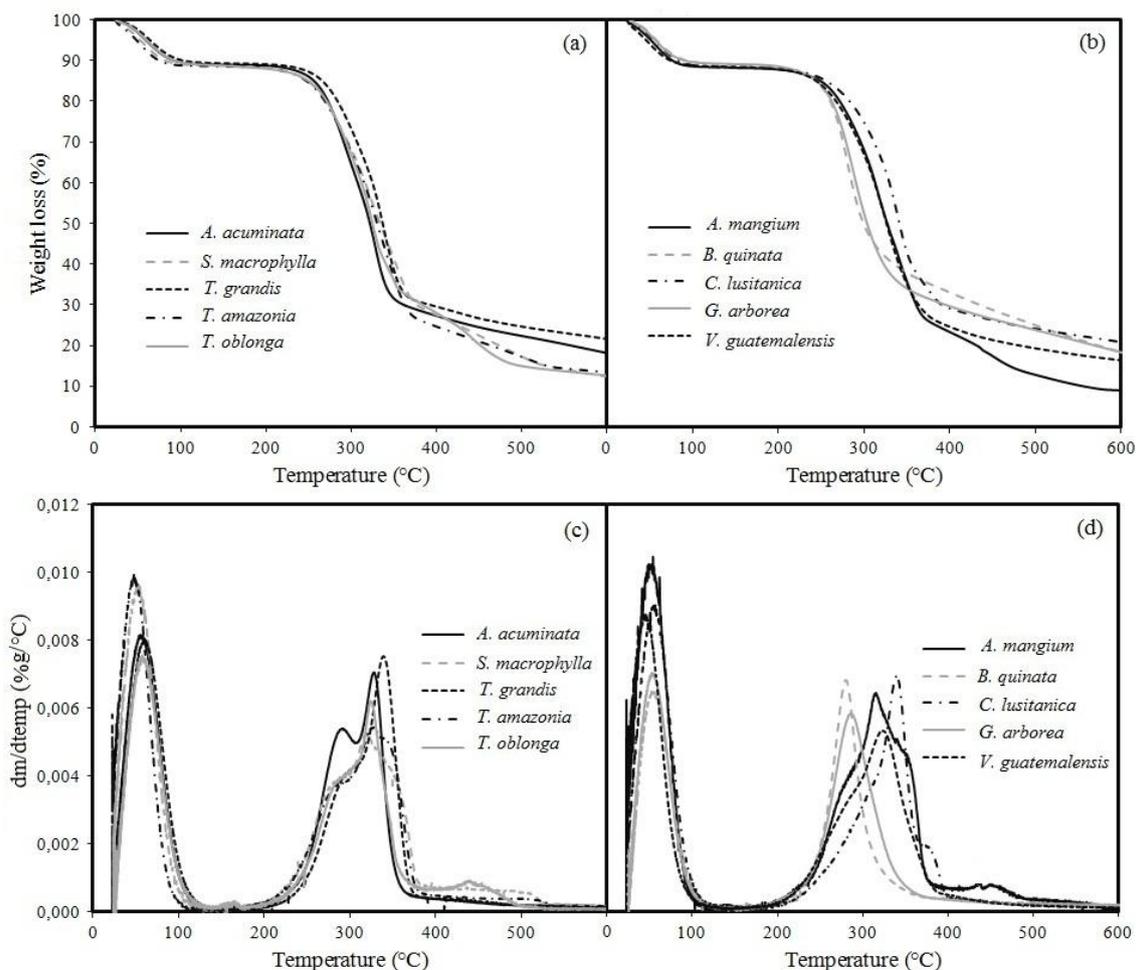


Figure 5. TGA (a, b) and DTG (c, d) curves of ten fast-growth species in Costa Rica.

En relación con los diferentes parámetros obtenidos de TGA se tiene que al inicio de la descomposición, la T_i varió de 192°C a 201°C con W_{ti} de 87.7% y 89.2%. En esta etapa *A. acuminata* es la especie de mayor T_i , seguida de un grupo de especies formado por *T. oblonga*, *G. arborea*, *B. quinata*, *T. grandis*, *A. mangium* y *C. lusitanica*, con temperaturas que varían de 194°C a 199°C, y finalmente un grupo compuesto por *V. guatemalensis*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* con los valores más bajos de T_i . A diferencia del parámetro T_i y el resto de parámetros evaluados, se encontró que W_{ti} es el parámetro donde se presentaron la mayor cantidad de diferencias entre las especies (Tabla 6). Las especies se agruparon de la siguiente manera: un primer grupo compuesto por *A. acuminata*, *G. arborea* y *T. grandis*, con valores que varían de 88.7% a 89.2% respectivamente, seguidas por *T. amazonia*, *S. macrophylla* y *B. quinata* y finalmente un grupo formado por *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *C. lusitanica* y *T. oblonga*, con los valores de W_{ti} más bajos (de 87.8% a 88.2%).

La etapa intermedia (T_{sh}), entre el punto de inicio y de máxima descomposición, no fue visible en *B. quinata*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*. Para el resto de las especies T_{sh} varió de 282°C a 316°C. La variación de W_{tsh} fue de 67.7% a 75.5% (Tabla 6). Las especies que presentaron T_{sh} fueron agrupadas de la siguiente manera: *T. grandis* y *C. lusitanica* como las especies de mayor temperatura, seguidas por *A. acuminata*, *T.*

amazonia y *T. oblonga* con Tsh de 291°C a 297°C, y finalmente *A. mangium* y *S. macrophylla* con las Tsh más bajas. De igual forma para Wtsh, *S. macrophylla* y *A. mangium* con los valores más altos, *C. lusitanica* con el valor más bajo y el resto de las especies entre 71.3% y 72.3%.

Con respecto a la mayor descomposición (máxima pérdida de masa), se observó que Tm varió de 282°C a 348°C y su Wtm varió de 28.6% a 40.0% (Tabla 6). Agrupando las especies de acuerdo a las diferencias estadísticas de las medias de Tm, 2 grupos pueden ser establecidos: uno compuesto por las especies *B. quinata* y *G. arborea* como las especies de menor Tm, y el resto de las especies con valores que varían entre 323°C (*V. guatemalensis*) y 348°C (*C. lusitanica*). En el parámetro Wtm, las especies se agruparon en 3 grupos: *B. quinata* y *G. arborea* con los valores más altos, seguido de *S. macrophylla* y *T. oblonga* con valores de 33.7% a 35.5%, luego se agrupa *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia*, *A. acuminata*, *T. grandis* y *C. lusitanica* con valores entre 28.6% y 32.1% (Tabla 6).

En la última etapa del TGA, se encontró que para la Tf la variación fue entre 365°C (*B. quinata*) y 401°C (*V. guatemalensis*). Las especies se agruparon en 3 grupos: *V. guatemalensis* como la especie con mayor Tf, *B. quinata* y *A. acuminata* como las especies con menor Tf, y el resto de las especies con Tf de 372°C a 388°C (Tabla 6). Para las masas del punto final de descomposición (Wft) aunque se presentaron mayores diferencias estadísticas entre especies, fue posible hacer 3 grupos (Tabla 6). *G. arborea*, *T. oblonga* y *B. quinata* como las especies de mayor porcentaje con Wft, *V. guatemalensis* como la especie de menor Wft y el resto de las especies agrupadas en el rango de 5.36% a 11.30%.

Tabla 6. Resultados del análisis de TGA para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

Especie	Ti (°C)	Tsh (°C)	Tm (°C)	Tf (°C)	Wti (%)	Wtsh (%)	Wtm (%)	Wtf (%)
<i>Acacia mangium</i>	198 ^{AB} (5.3)	282 ^E (3.1)	334 ^A (17.4)	375 ^{AB} (17.2)	87.8 ^E (0.1)	75.5 ^A (3.0)	28.6 ^C (5.0)	25.4 ^{BC} (3.3)
<i>Alnus acuminata</i>	201 ^A (2.4)	291 ^{CD} (2.5)	328 ^A (0.4)	368 ^B (6.3)	88.7 ^{ABC} (0.2)	71.3 ^{AB} (3.2)	31.6 ^{BC} (0.9)	28.9 ^{BC} (0.9)
<i>Bombacopsis quinata</i>	195 ^{AB} (4.1)	-	282 ^B (3.4)	365 ^B (12.8)	88.6 ^{BCD} (0.2)	-	40.0 ^A (0.1)	35.3 ^A (2.2)
<i>Cupressus lusitanica</i>	199 ^{AB} (1.6)	316 ^A (4.0)	348 ^A (17.5)	388 ^{AB} (9.8)	88.1 ^{CDE} (0.3)	67.7 ^B (0.2)	32.1 ^{BC} (4.9)	29.1 ^{BC} (4.3)
<i>Gmelina arborea</i>	194 ^{AB} (2.9)	-	285 ^B (1.9)	372 ^{AB} (9.0)	88.9 ^{AB} (0.2)	-	36.5 ^{AB} (1.3)	31.0 ^{AB} (0.9)
<i>Swietenia macrophylla</i>	192 ^B (3.0)	285 ^{DE} (3.8)	339 ^A (18.6)	387 ^{AB} (18.0)	88.4 ^{BCD} (0.2)	73.0 ^A (2.2)	33.7 ^{ABC} (5.7)	28.3 ^{BC} (3.2)
<i>Tectona grandis</i>	196 ^{AB} (1.9)	301 ^B (1.4)	338 ^A (0.6)	386 ^{AB} (4.8)	89.2 ^A (0.1)	72.3 ^{AB} (1.3)	32.1 ^{BC} (0.6)	29.9 ^{ABC} (0.5)
<i>Terminalia amazonia</i>	191 ^B (2.2)	292 ^{CD} (1.3)	338 ^A (10.2)	385 ^{AB} (14.2)	88.5 ^{BCDE} (0.4)	71.0 ^{AB} (2.5)	29.6 ^{BC} (1.9)	25.5 ^{BC} (1.5)
<i>Terminalia oblonga</i>	193 ^{AB} (3.2)	297 ^{BC} (2.2)	328 ^A (3.2)	376 ^{AB} (13.6)	88.2 ^{CDE} (0.1)	71.3 ^{AB} (0.8)	35.5 ^{ABC} (1.7)	31.3 ^{AB} (2.5)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	191 ^B (4.1)	-	323 ^A (1.8)	400 ^A (10.6)	88.1 ^{DE} (0.4)	-	29.6 ^{BC} (3.6)	24.4 ^C (3.5)

Note: Ti = temperature corresponding to the beginning of the decomposition. Tsh = temperature corresponding to deflection point before maximum decomposition; Tm=temperature corresponding to the maximum rate of mass loss; Tf = temperature corresponding to the ending of the decomposition; Wti = remnant mass at Ti; Wtsh = remnant mass at deflection point before maximum decomposition; Wtm = remnant mass at the maximum rate of mass loss; Wtf = remnant mass at Tf. Letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

La relación entre los parámetros de TGA (Ti, Tsh, Tm, Tf, Wti, Wtsh, Wtm and Wtm) y el poder calórico, los parámetros químicos y los extractos en diferentes solventes, mostró que el porcentaje de carbono, nitrógeno y celulosa y los extractivos en agua caliente, afectaron algunos parámetros del TGA. La Ti fue afectada negativamente por el poder calórico verde. La Tf fue afectada negativamente por el poder calórico máximo y positivamente por los extractivos en agua caliente. El porcentaje de carbono afecto en forma positiva a la Tsh y el porcentaje de nitrógeno en forma negativa a la Wti. La Wtm se vio afectada en forma negativa por el porcentaje de celulosa y en forma positiva por los extractivos en agua caliente.

INFORME FINAL DE PROYECTO

“Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento”

Tabla 7. Correlation coefficients between energy parameters, chemicals components, extractives and TGA parameters of ten fast-growth species in Costa Rica.

Characteristics	Ti (°C)	Tsh (°C)	Tm (°C)	Tf (°C)	Wti (%)	Wtsh (%)	Wtm (%)	Wtf (%)
PC verde albura	-	-	-	-	-	-	-	-
PC 0% albura	-	-	-	0.97*	-	-	-	-
Carbon (%)	-	0.98*	-	-	-	-	-	-
Nitrogen (%)	-	-	-	-	-0.98*	-	-	-
Ash (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Celullose (%)	-	-	-	-	-	-	-0.97*	-
Lignin (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Extractives in:	NaOH	-	-	-	-	-	-	-
	Hot wáter	-	-	-	0.95*	-	-	0.99**
	Cold wáter	-	-	-	-	-	-	-
	Dicloromethane	-	-	-	-	-	-	-
	Ethanol-Toluene	-	-	-	-	-	-	-

Note: Ti = temperature corresponding to the beginning of the decomposition. Tsh = temperature corresponding to deflection point before maximum decomposition; Tm=temperature corresponding to the maximum rate of mass loss; Tf = temperature corresponding to the ending of the decomposition; Wti = remnant mass at Ti; Wtsh = remnant mass at deflection point before maximum decomposition; Wtm = remnant mass at the maximum rate of mass loss; Wtf = remnant mass at Tf. * parámetro estadísticamente significante al 95% y ** parámetro estadísticamente significante al 99%.

La primera etapa de la curva de TGA (eliminación de agua y rango de temperatura antes de llegar a Ti-Figura 2a) debe ser explicada con la ayuda de la eliminación y la presencia del agua en la madera. El agua se presenta de 3 formas: el agua libre, el agua unida o ligada y el agua de constitución. El agua libre para evaporarse necesita poca energía, mientras que el agua ligada y de constitución forma enlaces químicos con las paredes de la madera y necesita de la carbonización completa para ser eliminada (Skaar 1972). Durante el proceso de combustión el agua libre se elimina entre los 60°C y 100°C (Wielage et al. 1999, Demirbas 2004, Shebani et al. 2008, Poletto et al. 2010). La eliminación de este tipo de agua se observa en la curva DTG como el punto máximo que se presenta antes de los 100°C (en este caso la humedad en las muestras fue aproximadamente de un 12%), correspondiente a una alta descomposición, sin embargo, este punto no se tomo en cuenta para el análisis de las especies (Figura 5c y b). Por otro lado, a diferencia de la eliminación del agua libre, el agua ligada asociada a los constituyentes de la madera (hemicelulosas y celulosas) ocurre sobre los 160°C, momento en que la estabilidad térmica comienza a decrecer gradualmente y las diferentes etapas de la descomposición inician (Wielage et al. 1999, Islam et al. 2011).

En la segunda parte de la curva de TGA, entre los 200°C y 400°C, y de acuerdo a Browne (1958), Demirbas (2004) y Poletto et al. (2010) pueden ocurrir dos eventos

distintos en el proceso de degradación: (i) por encima de los 250°C, inicia la descomposición de la hemicelulosa y la lenta degradación de la lignina, para este estudio este primer punto de descomposición se llamo Tsh y Wtsh, y ocurrió alrededor de los 282°C y los 316°C, pero solo fue posible identificar la descomposición de estos componentes de la madera en *A. mangium*, *S. macrophylla*, *A. acuminata*, *T. amazonia*, *T. oblonga*, *T. grandis* y *C. lusitanica*. (ii) alrededor de los 300°C se lleva a cabo la degradación de la celulosa y este punto es identificado como Tm y Wtm, y es donde se produce la máxima descomposición de la biomasa. En el caso de las especies estudiadas este punto si fue visible entre 282°C a 352°C (Tabla 6, Figura 5).

Finalmente la etapa final de la descomposición, donde todos los componentes de la madera se han degradado y quedan en su mayoría cenizas, corresponde al Tf, y en las especies analizadas esta variación se presentó en temperaturas de 365°C a 400°C (Tabla 6). En este caso para las 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones de Costa Rica, la temperatura de inicio de la descomposición varió (de 191°C a 200°C) son temperaturas ligeramente más bajas que las reportadas en otras especies tropicales, como por ejemplo *Dyera costulata*, *Endospermum diadenum*, *Paraserianthes moluccana*, *Hevea brasiliensis*, *Alistonia pneumatophora* y *Eucalyptus grandis* (Poletto et al. 2010, Islam et al. 2011). Pero los rangos de Tm y Tf son similares a los reportados para esas especies. Las diferencias encontradas entre los parámetros de las especies estudiadas con anteriores estudios también puede radicar en las condiciones utilizadas en el TGA, Islam et al. (2011) utilizaron muestras de 5 a 10 mg de aserrín de cada una de las especies a una velocidad de calentamiento de 10°C/min y Poletto et al. (2010) manejaron velocidades de 5 hasta 40°C/min para 10mg de aserrín, ambos estudios con condiciones diferentes a las utilizadas en el presente con muestras de 1mg y una velocidad de 20°C/min.

Las especies estudiadas presentaron diferencias estadísticas entre algunos de los parámetros del TGA (Tabla 6). Al respecto, Poletto et al. (2010) señala que las diferencias de TGA en las diferentes especies son asociadas con la cantidad de extractivos presentes las muestras de madera. Shebani et al. (2008) señalan que madera libre de extractivos mejora la estabilidad térmica en relación de aquella que presenta extractivos y que al incrementar la cantidad de celulosa y lignina tendrá mejor estabilidad térmica el material. Esto fue comprobado en el presente estudio con el análisis de correlación (Tabla 7) en la cual mostró que extractivos en agua caliente se encuentran relacionados positivamente con la Tf y la Wtm, de forma que a mayor cantidad de extractivos, mayor será la Tf y la Wtm (Tabla 7). Pero en el caso de la cantidad de celulosa mostro el efecto contrario del mencionado Shebani et al. (2008). La Wtm fue negativamente correlacionada con el porcentaje de celulosa, es decir, que a mayor porcentaje de celulosa, menor será la masa remanente en la temperatura de máxima descomposición, por lo tanto será menos estable (Tabla 7).

El análisis de correlación mostro que Ti, Tm, Wtsh y WTf, no fueron afectados por lo constituyentes químicos de la madera, no obstante en estos parámetros si se presentaron diferencias entre las especies, por lo que probablemente otros mecanismos o factores no evaluados en el presente estudio estén influyendo en el comportamiento térmico de las especies.

Islam et al. (2011) sugiere que aquellas especies con pérdidas de masa altas, presentan una menor estabilidad térmica. Basado en ello, en el punto de mayor descomposición (T_m) *B. quinata* y *G. arborea* presentan los valores más altos de masa remanente (W_{tm}) por tanto son especies de mayor estabilidad térmica y por tanto menos aptas para un proceso de combustión (Tabla 6). Por el contrario, las especies *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia*, *A. acuminata*, *T. grandis* y *C. lusitánica*, son de menor W_{tm} y por lo tanto son menos estables térmicamente y aptas para un proceso de combustión. En la etapa final de la descomposición *B. quinata*, *T. oblonga* y *G. arborea* presentan valores de W_{tf} más altos y por tanto son nuevamente las especies más estables térmicamente. *A. mangium* y *V. guatemalensis*, con valores de W_{tf} bajos, son menos estables y más aptas para la combustión (Tabla 6, Figura 5). Estos resultados sugieren que *G. arborea* y *B. quinata* son las especies que menos masa pierden durante el proceso de descomposición térmica, lo cual las hace menos aptas para ser utilizadas como combustibles, caso contrario al de *A. mangium* y *V. guatemalensis* especies más aptas debido a que pierden más masa. (Tabla 6).

3.7. Características de quemado

Las curvas de evolución de la masa con respecto al tiempo para las 10 especies se muestran en la figura 6. Como era de esperar, la pérdida de la masa está relacionada con el CH. En todas las especies para bajos CH (0%, 20% y 40%) la masa se quema más rápidamente que cuando se presentan CH cercanos al 100%. También es posible observar que en *C. lusitanica*, *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. grandis* el tiempo de quemado es más prolongado, estas tardan entre 30 a 60 minutos dependiendo del CH (Figura 6d, e, f, g, h y i), para alcanzar pérdidas de masa sobre 90%. A diferencia de las otras especies cuyos tiempos de quemado varían de 20 a 40 minutos para obtener la misma pérdida de masa (Figura 6a, b, c, j, k y l).

La evaluación del consumo de la masa en relación al tiempo (dm/dt) mostró los siguientes aspectos a destacar de las 10 especies de madera:

(i) Para *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* en los diferentes CH estudiados se identificaron claramente cada una de las etapas del quemado con el parámetro dm/dt (Figura 7h, i, j y k)

(ii) En las especies *A. acuminata* y *S. macrophylla* se identificaron las diferentes etapas de quemado (Figura 7b y g) pero no con la facilidad con que se distinguen en *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*.

(iii) Para *A. mangium*, *B. quinata* y *C. lusitanica* en CH sobre 40% no fue posible distinguir en forma clara las etapas, principalmente las de ignición y fin de llama (Figuras 7a, c y d). Contrario a los CH de 0% y 20% donde si se pueden apreciar en forma clara las diferentes etapas del quemado.

(iv) *G. arborea* y *V. guatemalensis* en CH de 40, 60, 80 y 100% no fue posible identificar las diferentes etapas de quemado (inicio de pirolisis, ignición, fin de llama e inicio de incandescencia) (Figura 7e, f y l).

(v) Los valores de consumo de masa en tiempo (dm/dt) variaron con el CH. En maderas de bajos CH (0% a 40%) se presentan valores máximos de dm/dt , con una variación de 1.20 a 4.28 g/min. Mientras que en madera de altos CH (60% a 100%) se obtiene valores de 1.19 a 1.97 g/min.

(vi) *T. oblonga*, *A. mangium*, *A. acuminata*, *T. amazonia* y *B. quinata* son las especies que presentan los valores más altos de dm/dt . Mientras que *S. macrophylla*, *T. grandis* y *C. lusitanica* presentan los valores más bajos, para CH de 0% a 40%.

Como es de esperar, la mayor tasa de consumo (g/min) se presentó en bajos CH, es decir la madera se quema en forma más rápida, pero la tasa de quemado fue diferente en cada una de las especies. De forma que dependiendo del uso energético, las especies se pueden dividir en dos grupos: (i) especies de rápida combustión (*T. oblonga*, *A. mangium*, *A. acuminata*, *T. amazonia* y *B. quinata*) que en bajos CH entregan todo su calor en un período de tiempo corto (20 a 40 minutos) y a tasas de quemado más altas. (ii) especies de combustión lenta (*C. lusitanica*, *G. arborea*, *S. macrophylla*, *T. grandis* y *V. guatemalensis*), como por ejemplo para calefacción, como cuyo tiempo de quemado es más prolongado (30 a 60 minutos), y además presentan tasas de consumo de masa bajas (Figuras 6 y 7).

En especies de baja densidad como *G. arborea* y *V. guatemalensis* en CH de 40%, 60%, 80% y 100% su uso para combustión es poco recomendable, esto porque no es posible identificar claramente las diferentes etapas del proceso de quemado. En el caso que se utilicen bajos CH (inferior a 20%) las tasas de quemado son bajas, de 1.20 a 2.39 g/min y 1.26 a 1.87 g/min respectivamente (Figuras 6 y 7). El comportamiento del quemado en estas dos especies, presenta poca claridad en las diferentes etapas como resultado de una baja liberación de volátiles o de una liberación simultánea de agua y volátiles es la fase de ignición, esto hace que el consumo de masa durante el proceso de quemado tienda a ser constante, y no se produzca la ignición (Castro et al. 2007).

.

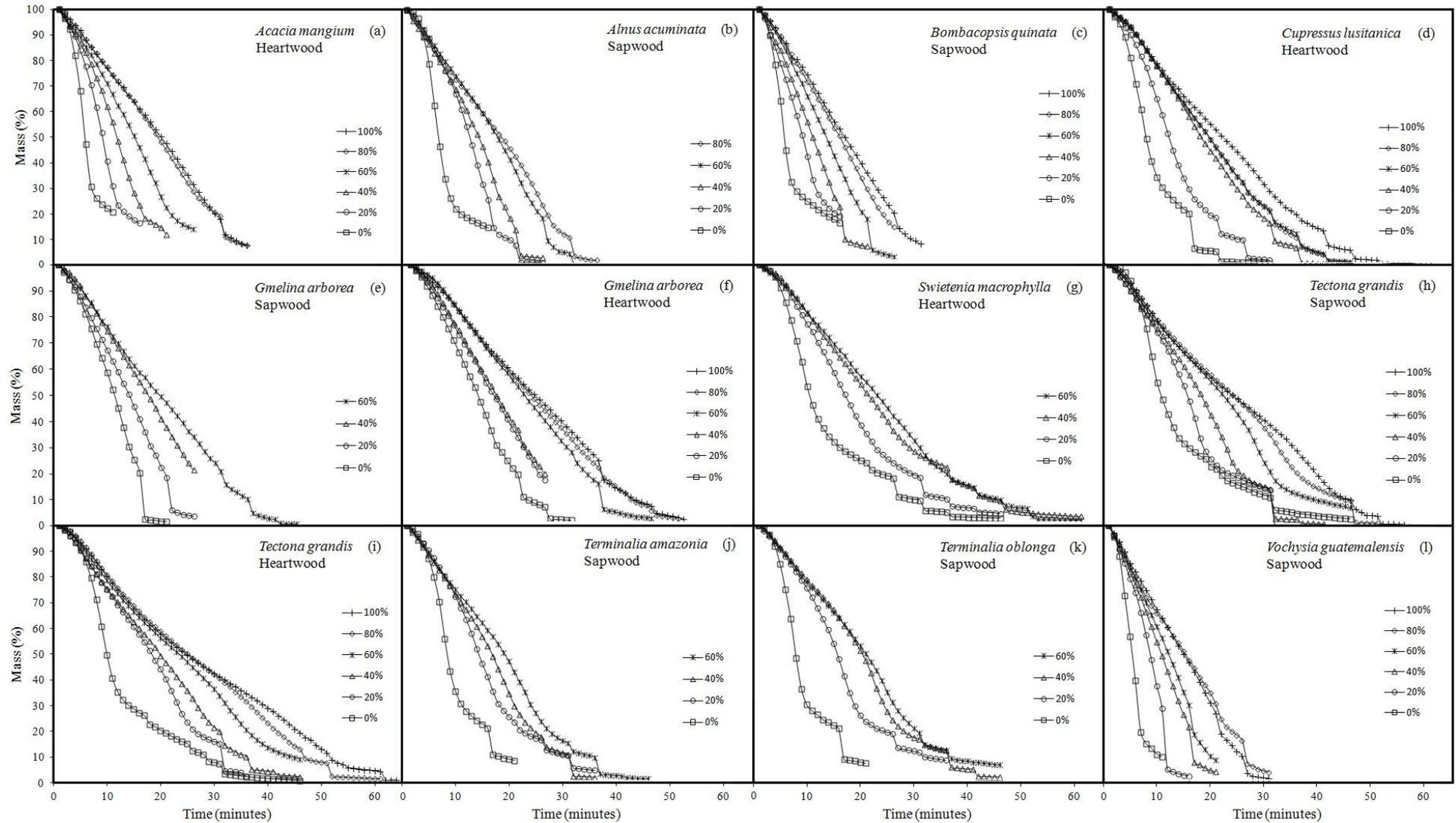


Figura 6. Evolución de la masa con respecto al tiempo para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

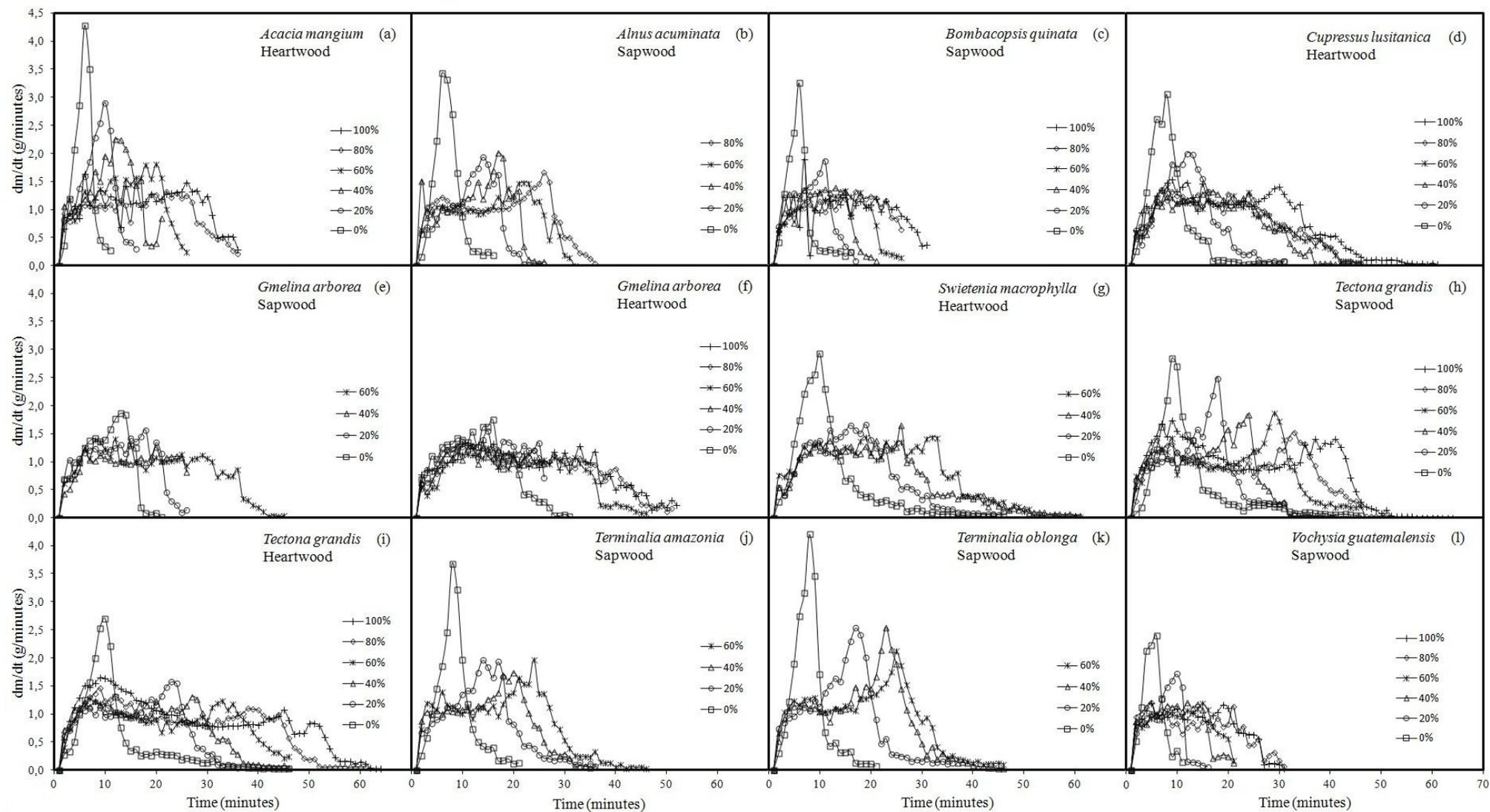


Figura 7. Rangos de consumo de masa para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

La figura 8 presenta la masa consumida por especie en los diferentes CH para las diferentes etapas de quemado. Se observa que en todas las especies y para los diferentes MC, la etapa de ignición es la que presenta el mayor consumo de masa, con valores que varían de 40% a 70% y además el consumo de masa tiende a aumentar conforme se incrementa el CH. En *B. quinata* (Figura 8c) y *G. arborea* (Figura 8e) el consumo de la masa en la etapa de ignición disminuye en los CH de 40% y 20% respectivamente. La etapa de secado y pirólisis, es por el contrario, la etapa donde se presenta el menor consumo de masa, con valores que varían de 2% a 7% en las diferentes especies. Es interesante hacer notar que en esta etapa el consumo de masa tiende a ser constante en los diferentes CH analizados.

En tanto que el consumo de la masa para las etapas de fin de llama e incandescencia, se mantienen con valores intermedios entre los valores de la etapa de ignición y secado y la etapa de pirólisis para la mayoría de las especies, con excepción de *T. grandis* (Figura 8g), donde esta última curva se mezcla con las curvas de fin de llama e incandescencia a partir del CH de 60%. En estas especies la tasa de consumo en fin de la llama e inicio de la incandescencia tiende a disminuir conforme aumenta el CH, con excepción de *B. quinata* y *G. arborea* donde la curva de fin de llama aumenta a partir del 40% de CH (Figura 8c) en *B. quinata* y en 20% para el fin de llama e incandescencia en *G. arborea* (Figura 8e). Como fue indicado para *G. arborea* y *V. guatemalensis* solo en los CH bajos fue posible identificar las diferentes etapas de quemado, de forma que solo se presentan las curvas para estos CH (Figure 8e y j).

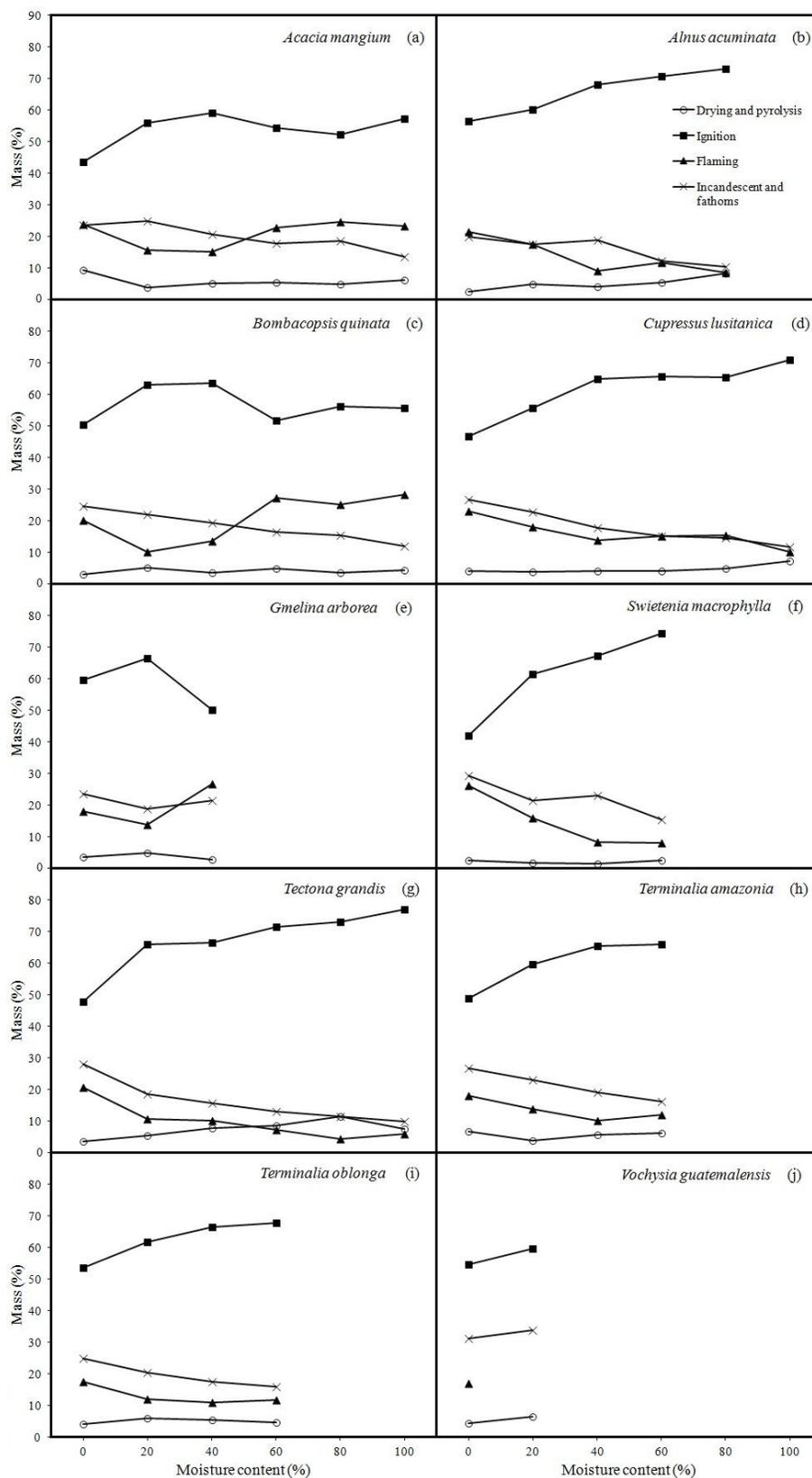


Figura 8. Masa consumida por especie y por etapa a diferentes contenidos de humedad para 10 especies de rápido en Costa Rica.

La comparación de la masa consumida para las diferentes etapas de quemado de las 10 especies de reforestación es presentada en Figura 9. En la etapa de secado y pirólisis no se presentan grandes diferencias entre el consumo de masa en las diferentes especies y los diferentes CH, la única especie con valores ligeramente más altos es *T. grandis* (Figura 9a). En la etapa de ignición se presentan los consumos de masa más bajos para CH de 0%, sin embargo, el consumo de masa aumenta conforme aumenta el CH. *A. acuminata* es la especie que presenta los consumos de masa más altos y por el contrario *A. mangium* es la que presenta menor consumo de masa (Figura 9b). Las etapas de fin de llama e incandescencia presentan comportamientos similares entre las especies. En este caso los CH más bajos presentan los consumos de masas más altos (Figura 9c y d). En la etapa de fin de llama *T. grandis* y *S. macrophylla* son las especies que presentan mayores diferencias entre CH. En la etapa de incandescencia y brasas *T. grandis* es la especie que presenta una mayor diferencia entre el CH de 0% y el resto de CH.

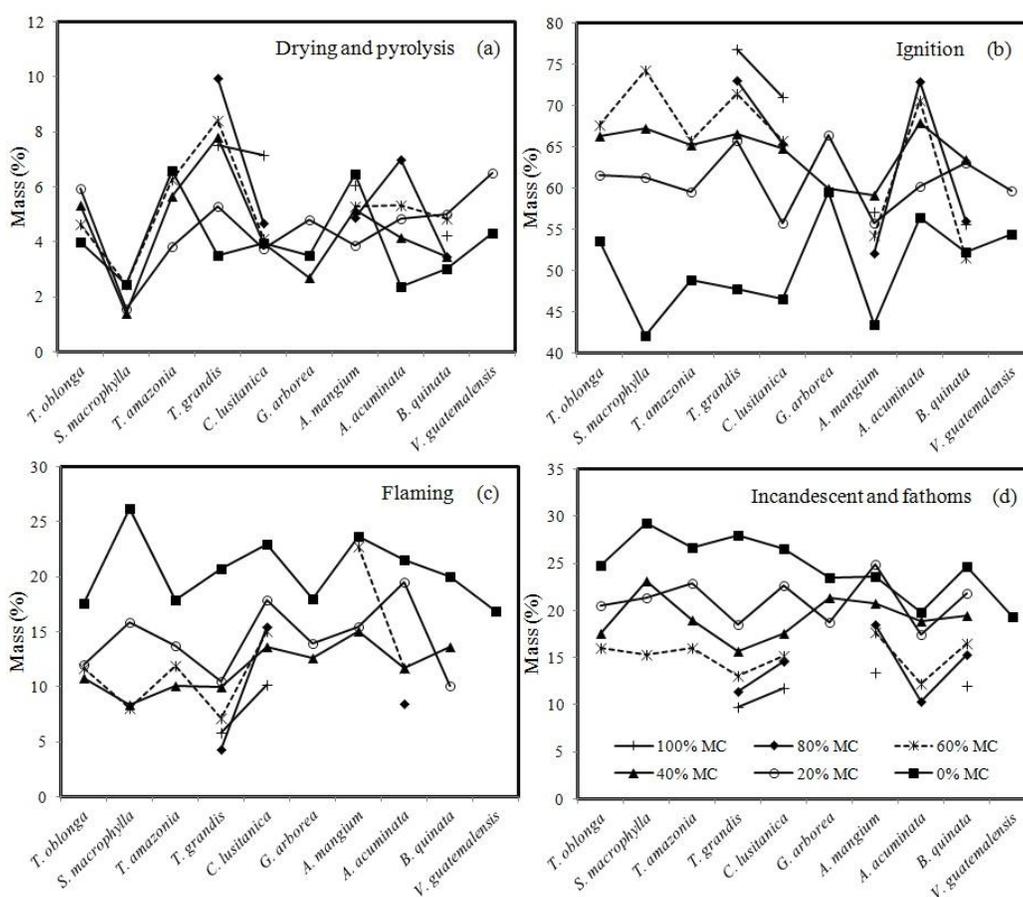


Figura 9. Masa consumida por etapa y contenido de humedad para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

La etapa de secado y pirolisis es la etapa más constante del proceso de quemado, en esta se presentan menos variaciones en el porcentaje de masa entre especies y CH, además de ser la etapa de menor consumo de masa. Y por el contrario la etapa de ignición, es donde se presenta el mayor consumo de masa, y la mayor variación entre especies. Así mismo es importante hacer notar que cuando se presentan bajos CH se presentan bajos consumos de masa, esto porque la masa que está siendo quemada corresponde al tejido leñoso, caso contrario a los CH altos, donde la pérdida de la masa en esta etapa está dada mayormente por la pérdida de agua. Es de esperar que cuando la madera presenta bajos CH en las etapas de fin de llama e incandescencia, se presente el mayor consumo de masa (Castro et al. 2007).

En el presente estudio se observó que la humedad es el principal factor que influye en el comportamiento de la combustión de las especies maderables de plantación. No obstante, otros factores también afectan la combustibilidad, como lo son la porosidad y otras características químicas y físicas, las cuales pueden afectar la pérdida de masa y la liberación de volátiles durante la combustión de la madera (Castro et al. 2007).

3.8. Variación del contenido de humedad

Como era de esperar en todos los casos el CH disminuyó con el tiempo para todas las especies y diferentes dimensiones de astillas (Figura 10). Las astillas de 10 cm de largo en los diferentes anchos (4,5, 6,3 y 10 cm) son las que presentan las pérdidas de humedad más lentas, seguidas de las astillas de 7 cm de largo y finalmente con pérdidas de humedad más rápidas las astillas de 5 cm de largo (Figura 10). Únicamente el duramen de *G. arborea*, presentó un comportamiento distinto, donde las astillas de 5 cm y 7 cm para el ancho de 10 cm, presentaron las pérdidas de humedad más lentas (Figura 10f). Con respecto a los anchos en las astillas, en ninguna de las especies se observó una tendencia clara en establecer cual ancho pierde humedad más rápidamente (Figura 10).

Otro resultado importante encontrado fue que especies como *A. mangium*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* y *C. lusitanica*, requieren más tiempo para perder su humedad en relación al resto de las especies (*A. acuminata*, *B. quinata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*). El primer grupo de especies necesitan de aproximadamente de 10 horas (Figura 10d, e, f y l), mientras que el otro grupo requiere de entre 8 y 10 horas (Figura 10a, b, c, g, h, i, j y k). Por otro lado *A. mangium*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*, poseen los contenidos de humedad más altos (InCH superior al 5%), y *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga*, los más bajos (InCH inferior al 5%). En el caso de las especies que presentaron albura y duramen se observaron pequeñas diferencias entre los dos tipos de madera. Para el caso *G. arborea*, la madera de albura (10 horas) presentó una pérdida de humedad más rápida que la madera de duramen (más de 12 horas), además se observa que la madera de duramen (InCH superior a 5% que corresponde a un valor de 143%) posee un CH más alto que la de albura (InCH inferior a 5% que corresponde a un 113%) (Figura 10e y f). Para *T. grandis*, no se observaron

diferencias en cuanto al tiempo de pérdida de humedad, ambas especies poseen un tiempo de más de 8 horas. Sin embargo, al igual que con las astillas de *G. arborea*, la madera de duramen (145%) posee un CH más alto que la de albura (122%) (Figura 10h y i).

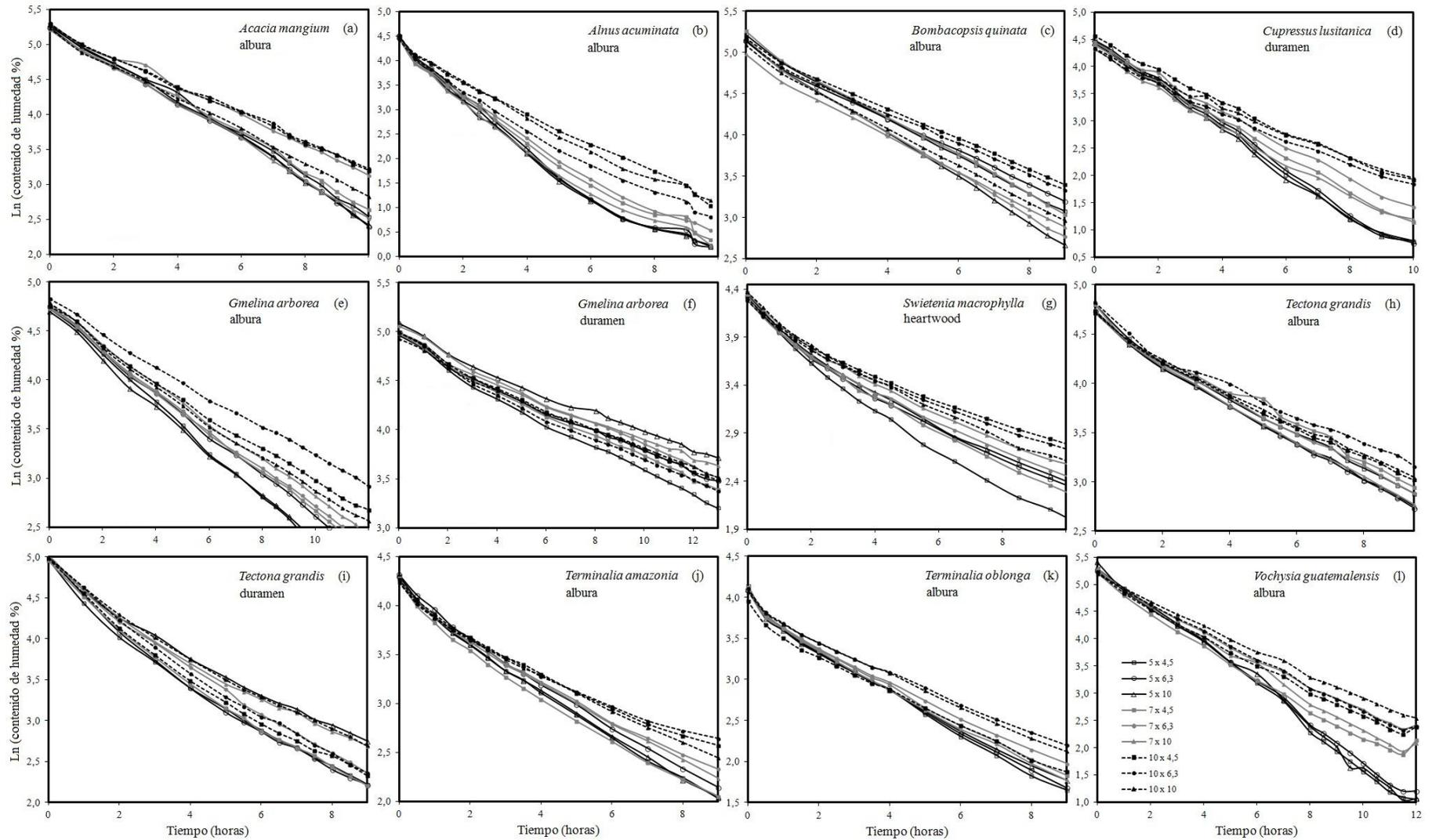


Figura 10. Variación del contenido de humedad en relación al tiempo para astillas de diferentes dimensiones de 10 especies de plantación.

3.9. Coeficientes de difusión

La figura 11 presenta los coeficientes de difusión (D) para cada una de las especies estudiadas y para cada tipo de astilla. *A. mangium* y *V. guatemalensis* presentan los coeficientes de difusión más altos con valores que van de 1504 a 2162 x 10⁻⁶ cm²/s, y de 1326 a 2790 x 10⁻⁶ cm²/s, respectivamente. Y por el contrario los coeficientes más bajos los presenta *S. macrophylla* con valores que van de 162 a 300 x 10⁻⁶ cm²/s, y *T. oblonga* con valores de 159 a 266 x 10⁻⁶ cm²/s. En el caso de las especies que presentaron albura y duramen, se tiene que: (i) en *T. grandis*, la madera de duramen obtuvo un D más alto que la madera de albura (Figura 11g) y (ii) en *G. arborea* no se observan diferencias entre los D de duramen y albura (Figura 11e).

En relación con la variación de D con los diferentes anchos y largos se encontró que en el caso de *B. quinata* y *S. macrophylla* no se presentó ninguna diferencia estadística entre los tres largos para cada tipo de ancho de astillas (Figuras 11c, f). En el resto de las especies (*A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *T. oblonga* y *V. guatemalensis*) si se presentan diferencias entre en los largos para cada tipo de ancho (Figura 11). Se determinó que los D más altos se presentan para las astillas de 5 cm de largo, especialmente para los anchos de 6,3 cm y 10 cm.

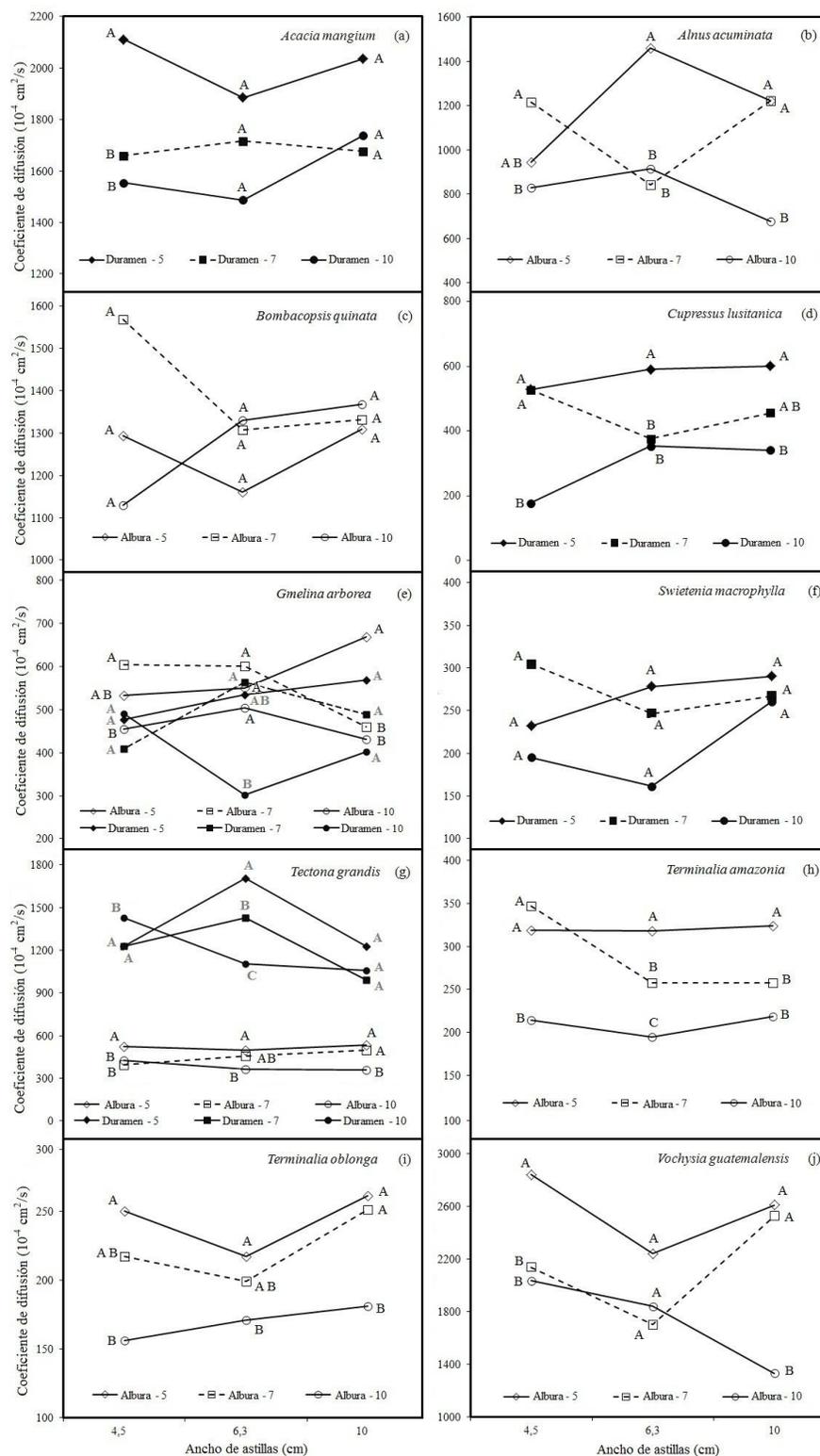


Figura 11. Coeficientes de difusión de las diferentes dimensiones de astillas para 10 especies de plantaciones forestales.

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

3.1. Relación del coeficiente de difusión con el contenido de humedad y el peso específico

Los datos de la tabla 8 señalan que la mayor cantidad de relaciones se presenta entre el D con el CH y por tanto la menor cantidad de relaciones se presentan entre D y el PE. Así mismo la relación entre D y el CH fue positiva en las distintas dimensiones de las astillas, y por el contrario, en el PE las relaciones son negativas en todas las especies estudiadas. Se observó que en la madera de *T. grandis* se presentó una relación estadísticamente significativa para todas las dimensiones de las astillas tanto con el CH como con el PE. Por el contrario, la madera de *G. arborea*, no presentó relación con el PE para ninguna astilla, pero sí con el CH. Así mismo se determinó que en la madera de *T. amazonia*, solo presentó una relación positiva con el CH para las astillas de 4,5 x 7 cm, y negativa con el PE para las astillas de 10 x 10 cm. En *B. quinata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, fueron especies que se presentaron sobre 8 diferentes relaciones entre D y el PE o el CH. En tanto que el resto de las especies (*A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*) la cantidad de relaciones fue menor a 6 (Tabla 8).

Tabla 8. Coeficientes de correlación entre el coeficiente de difusión, el contenido de humedad y el peso específico.

Especie	Ancho (cm)	Contenido de humedad			Peso específico		
		Largo de 5 cm	Largo de 7 cm	Largo de 10 cm	Largo de 5 cm	Largo de 7 cm	Largo de 10 cm
<i>Acacia mangium</i>	4,5	0,76**			-0,62*		
	6,3		0,68**			-0,56*	
	10		0,68**			-0,65**	
<i>Alnus acuminata</i>	4,5		0,70*	0,72**			-0,80*
	6,3		0,68*				
	10						
<i>Bombacopsis quinata</i>	4,5	0,58*	0,95**		-0,56*	-0,97**	
	6,3	0,58*	0,74**	0,63*		-0,82**	
	10	0,77**	0,76**	0,73**			
<i>Cupressus lusitánica</i>	4,5	0,92**	0,96**		-0,76*	-0,91**	
	6,3	0,98**	0,86*	0,98**			
	10	0,96**	0,96**	0,77**		-0,78**	-0,88**
<i>Gmelina arborea</i>	4,5	0,58*		0,80**			
	6,3	0,57*		0,60*			
	10		0,83**	0,66*			
<i>Swietenia macrophylla</i>	4,5		0,80*	0,82**			
	6,3	0,73*		0,79*		-0,77*	
	10	0,88**	0,88**	0,94**			
<i>Tectona grandis</i>	4,5	0,86**	0,80**	0,72**	-0,78**	-0,72**	-0,65**
	6,3	0,88**	0,86**	0,81**	-0,78**	-0,82**	-0,71**
	10	0,78**	0,87**	0,89**	-0,75**	-0,86**	-0,84**
<i>Terminalia amazonia</i>	4,5		0,55*				
	6,3						
	10						-0,69*
<i>Terminalia oblonga</i>	4,5	0,87**		0,71*	0,87**		-0,55*
	6,3	0,91**			-0,86**	-0,53*	
	10	0,85**	0,89**	0,78**	-0,92**	-0,92**	-0,83**
<i>Vochysia guatemalensis</i>	4,5	0,57*					
	6,3			0,71**	-0,70*		
	10	0,68**	0,79**			-0,81**	

La reducción del CH con tiempo es matemáticamente explicada por una relación exponencial $Y = b \cdot e^{-a \cdot CH}$, donde a y b son constantes del modelo, Y es el tiempo de secado y CH el contenido de humedad de la madera (Souza et al. 1995). Esta relación es conocida como el

modelo de Henderson and Pabis (Henderson y Pabis 1961). En todas las especies estudiadas se presenta este comportamiento, solo que con la finalidad de observar las diferencias entre las diferentes condiciones se linealizó el modelo (Figura 2). Las diferencias encontradas están relacionadas al tipo de madera (albura o duramen) y a las dimensiones de las astillas.

En relación al tipo de madera, se determinó que esta se encuentra relacionada a la pérdida de humedad con el tiempo. En la mayoría de las especies el duramen usualmente tiene CH más bajos que la madera de albura (Skaar 1972). Sin embargo, en las especies (*G. arborea* y *T. grandis*) que se presentaron ambos tipos de madera, se encontró que la madera de duramen presentó CH más altos que los medidos en la madera de albura (Tabla 1). Al presentar el duramen mayor cantidad de agua, se hace necesario de un mayor tiempo para la eliminación de esta de la astilla, de forma tal que el tiempo de eliminación de agua de la albura en *G. arborea* y *T. grandis* es menor que el durado en el duramen.

En relación con las dimensiones de las astillas, se tiene que los tiempos de pérdida de humedad más bajos se encontraron en las astillas más cortas (5 cm) a diferencia de los largos de 7 y 10 cm, pero, en relación con los anchos estudiados (4,5 cm, 6,3 cm y 10 cm) no se observó ningún tipo de influencia de estos en la pérdida de humedad (Figura 2). En cuanto a la influencia del espesor no se logró determinar la influencia ya que solamente se utilizó un espesor de 1 cm. El movimiento del agua dentro de una pieza de madera de forma rectangular se da más rápidamente en el sentido longitudinal, debido a que los elementos celulares de principal conducción se orientan en este sentido, posteriormente, el flujo de agua ocurre por el espesor de la pieza y finalmente por el ancho (Siau 1984, Skaar 1972, Siau 1971). De acuerdo a lo anterior, es poco factible que el movimiento del agua en los diferentes anchos de las astillas investigados tenga efectos importantes en la variación del secado de estas, de forma que se presentan pocas diferencias en los tiempos de secado, tal y como ocurrió en el presente trabajo (Figura 2). La geometría de la astilla utilizada, permite que la humedad busque salir por el espesor y no por el ancho, en el cual el agua tendría pasar a través de las paredes celulares y por lo tanto el movimiento sería más lento (Skaar 1972).

Se ha señalado que altos CH inicial en las especies tienden a prolongar los tiempos de secado (Denig et al. 2000, Tenorio et al. 2012). Resultado encontrado en el presente estudio. Las especies de altos CH, como *A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*, presentaron los mayores tiempos de pérdida de humedad (Figura 2). No obstante, un resultado, poco esperado fue encontrado en *C. lusitanica* que presenta un CH de 87%, mucho más bajo que el de *A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis* (Tabla 1), sin embargo, se observó que presenta un tiempo de secado también alto. Este mismo comportamiento fue observado por Moya et al. (2013) cuando estudiaron el secado de madera aserradera de estas especies. Este comportamiento de *C. lusitanica* puede ser explicado por el hecho de que se trata de una conífera, en las cuales el movimiento de la humedad dentro de la madera se realiza principalmente por los lúmenes de la traqueidas y las puntuaciones (Siau 1971) que por lo general presentan una velocidad de flujo de agua menor a las latifoliadas (resto de las especies estudiadas) ya que el flujo de agua ocurre por los lúmenes de los vasos y los lúmenes de las células (Siau 1971). Los lúmenes de las traqueidas son pequeños en relación con los lúmenes de los vasos, además en las puntuaciones en el duramen de las coníferas por lo general se encuentran aspiradas lo que no permite el flujo del agua (Siau 1971). Dichas diferencias explican la diferencia encontrada entre el *C. lusitanica* y el resto de las maderas latifoliadas estudiadas.

El D además de aspectos intrínsecos de la madera varía con la temperatura a la cual es determinado (Siau 1971). Por ejemplo Mukam et al. (2005) para la especie tropical de *Terminalia superba*, encontraron valores de $30500 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ con una temperatura de 30°C , valores inferiores a los reportados para las 10 especies de este estudio, con 75°C . La temperatura causa un incremento en D (Siau 1971), lo que significa que al aumentar la temperatura a la cual se realizan las pruebas de difusión, se incrementan los valores de D , lo cual explica el hecho de que los D reportados en este estudio se han superiores, ya que la temperatura utilizada en este caso fue de 75°C .

Para las especies que presentan albura y duramen el comportamiento de D fue distinto. En el caso de *T. grandis*, el duramen presentó D más altos que los encontrados en la albura (Figura 3g), sin embargo en *G. arborea* (Figura 3e), esta diferencia nos es tan marcada como ocurre en *T. grandis*, probablemente por la presencia de sustancias tóxicas dentro de los lúmenes de los vasos que impiden el flujo de agua dentro de la madera (Moya et al. 2008).

Los valores de D nuevamente confirman que la pérdida de humedad se presenta más rápidamente en las astillas de 5 cm de largo, ya que este tipo de astilla presenta un valor de D más alto en los 3 anchos para la mayoría de las especies, tal como ocurrió en el tiempo de secado (Figura 2). Nuevamente este comportamiento es explicado por la disposición de los elementos celulares, de forma que en el sentido longitudinal se presenta un movimiento de agua mayor y el flujo del agua en este sentido es mayor en el largo de 5 cm, en comparación con los largos de 7 y 10 cm. Mukam et al. (2005), confirman estos resultados al determinar que el D longitudinal es de 10 a 15 veces mayor que el coeficiente de difusión tangencial, como consecuencia de que las cavidades celulares constituyen obstáculos difíciles de cruzar para las moléculas de agua.

La correlación encontrada entre el D y CH en cada una de las especies fue positiva en todos los casos (Tabla 3). Simpson (1993) demostró que los valores de D aumentan en forma exponencial con el CH, esto significa que cuando se presenta un alto CH presentan altos D . Esto puede ser explicado por el hecho que menos energía es requerida para desplazar y mover las moléculas de agua en altos CH, debido a su alto potencial de energía (Siau 1971) También se observó una relación negativa con el PE, lo que significa que el D tiende a disminuir conforme aumenta el PE de las especies. Sin embargo esta relación no ocurrió en todas las especies. Por ejemplo en *T. grandis* fue posible observar que las variaciones de CH y PE dentro de la especie, están altamente relacionadas con el D sin importar las dimensiones de las astillas. Situación que no se presenta con *G. arborea*, donde únicamente el CH influye en los D . Otro ejemplo es el ocurrido en *T. amazonia*, en donde las variaciones del CH y el PE parecen no tener influencia en el D , ya que únicamente se presentó una relación positiva con el CH para las astillas de $4,5 \times 7 \text{ cm}$, y negativa con el PE para las astillas de $10 \times 10 \text{ cm}$. En el caso de *B. quinata*, *C. lusitanica* y *S. macrophylla* se puede decir que las variaciones del CH poseen una mayor influencia en el D , que el PE, ya que para estas especies la mayoría de las dimensiones de las astillas tuvieron una relación significativa del CH con el D , y no así con el PE. Contrario a *T. oblonga*, en la cual las variaciones en el PE

afectan mayormente a los *D*. Para el resto de las especies *A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*, la influencia tanto del CH como del PE en el *D*, fue muy baja, es posible que para estas especies, la difusión del agua se vea afectada por otro tipo de variables, tales como la presencia de puntuaciones y de radios que afectan el flujo del agua dentro de la madera (Saiu 1971) y que no fueron investigadas en este estudio.

4. CONCLUSIONES

Los parámetros energéticos presentaron variaciones entre las especies de rápido crecimiento en plantaciones. La única conífera (*C. lusitanica*), presente de las 10 especies estudiadas, fue la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de FVI, PC y sus bajos contenidos de cenizas. Sin embargo, es necesario determinar los rangos de crecimiento y productividad de esta especie, así como establecer su óptimo desempeño en plantaciones orientadas a la producción de energía. No obstante, las otras especies de plantación a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

El PC (máximo y verde) y el FVI fueron afectados por los parámetros químicos y por la cantidad de extractivos que presenta la madera. En las especies que presentaron duramen fue encontrado que el contenido de C y la cantidad de cenizas afectaron negativamente el PC máximo, y la cantidad de N, lignina y los extraíbles en diclorometano afectaron positivamente el PC verde, en tanto que la cantidad de cenizas afectó negativamente el PC verde. En la madera de albura el PC fue menos afectado, la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno afectó significativamente el PC máximo y la cantidad de cenizas afectó el PC verde. El FVI fue afectado por la cantidad de C y de lignina, y por los extraíbles en NaOH y diclorometano.

Como era de esperar el CH presentó un efecto lineal sobre el PC de la madera, sin embargo, la influencia del CH en el PC es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). Esto sugiere que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo, como la influencia de los extractivos de la madera. En el caso del duramen, la gradiente de la pendiente (β_0) fue afectada solamente por la lignina por parte de los parámetros químicos y por parte de los extraíbles fue afectada por el NaOH y diclorometano, pero en el caso de la albura solamente fue afectada significativamente por el porcentaje de cenizas.

Basados en los resultados de las pruebas de quemado y las curvas de TGA, se tiene que especies como *B. quinata*, *V. guatemalensis* y *G. arborea* son especies de mayor estabilidad térmica y con etapas del proceso de combustión poco definidas, lo que las hace menos aptas para un proceso de combustión. Por el contrario, las especies *T. grandis*, *S. macrophylla* y *C. lusitánica* poseen una estabilidad térmica menor, pero un proceso de combustión con etapas bastante definidas, lo cual hace que estas especies sean más aptas en procesos de combustión donde se necesite generar calor. En tanto que el resto de las especies *A. mangium*, *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga* son especies con propiedades de

combustión aceptables que ofrecen los diferentes parámetros de combustión fácilmente identificables y estabilidad térmica moderada.

Para estas especies el contenido de humedad resulto ser el factor que tiene mayor influencia en el proceso de combustión y de estabilidad térmica de la madera. Sin embargo, existen otros factores también pueden tener algún grado de relación con estos procesos como lo son los extractivos, la porosidad y algunas características químicas y físicas.

Las diferencias encontradas en cuanto a los tiempos de secado de las astillas están relacionadas al (i) tipo de madera (albura o duramen), en las especies que presentaron ambos tipos de madera se encontró que el duramen requiere de un mayor tiempo para eliminar el agua que la madera de duramen, (ii) al CH, las especies de mayor CH (*A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*) presentaron los tiempos de secado más altos, y (iii) a las dimensiones de las astillas, las astillas de 5 cm de largo, perdían la humedad en forma más rápida que las de 7 cm y 10 cm, además no se presentó ningún tipo de relación del ancho en el tiempo de secado.

En relación con el D , este parámetro es relacionado con (i) las dimensiones de las astillas, las astillas de 5 cm de largo presentan coeficientes más altos en los 3 anchos, (ii) el CH, para la mayoría de las especies las variaciones del CH afectan positivamente el D , (iii) el PE, aunque en menor medida que el CH, el PE afectó negativamente el D . *T. grandis* fue la única especie donde el CH y el PE presentaron relación con el D para todas las dimensiones de astillas, caso contrario a *T. amazonia*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*, donde las variaciones del CH y el PE no parecen tener mayor influencia en el D . Especies como *G. arborea*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, presentaron una mayor relación del CH con el D .

5. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores de este proyecto dan las gracias a las siguientes personas, organizaciones y empresas: a los funcionarios del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) por su trabajo en la ejecución de las pruebas químicas y demás ensayos. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento del proyecto. A las personas, empresas e instituciones: Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A., Barca S.A., Precious Woods S.A., Estación Experimental Forestal Horizontes (SINAC-MINAET), Universidad EARTH, a los señores Ricardo Solano y Rafael Varela, por facilitar el material para la realización del proyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abdullah. SS; Yusup. S; Ahmad. MM; Ramli. A; Ismail. L. 2010. Thermogravimetry study on pyrolysis of various lignocellulosic biomass for potencial hydrogen production. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*. 3(3):137-141.

Alice, F; Montagnini, F; Montero, M. 2004. Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la Estación Biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agromonía Costarricense*. 28(2): 61-71.

Andersen, R; Towers, W; Smith, P. 2005. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass and Bioenergy*. 29(2): 73-82.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003a. 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.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003b. D 4442-92 Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-based materials. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003c. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003d. D-1102-84 Standard test method for ash in wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003e. D-1110-84 Standard test method for water solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003f. D-1109-84 Standard test method for 1% sodium hydroxide solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003g. D-1107-84 Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003h. D-1108-96 Standard test method for dichloromethane solubles in wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

Berndes, G; Hoogwijk, M; Van den Broek, R. 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 25(1): 1-28.

Browne, FL. 1958. Theories of the combustion of wood and its control. A survey of the literature. U.S. Forest Prod. Lab. Rep. 2136. 59pp. Madison .Wis.

- Boszko, M; Malczewski, J; Grabarczyk, R. 2007. Convective drying of wood chips at high temperature. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 52(2): 61-62.
- Cai, L. 2005. Determination of diffusion coefficients for sub-alpine fir. *Wood Science and Technology*. 39:153–162.
- Castro, A; Costa, FS. 2007. Drying and burning characteristics of ipe branco Wood cylinders. *Thermal Engineering*. 6(1): 35-40.
- Danvind, J; Ekevad, M. 2006. Local water vapor diffusion coefficient when drying Norway spruce sapwood. *Wood Science Journal*. 52:125–201.
- Demirbas. A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 219-230.
- Demirbas, A. 2009. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energ Explor Exploit*. 20: 105-11.
- Demirbas, C; Demirbas, T. 2009. Fuel properties of wood species. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 31: 1464-72.
- Denig, J; Wengert, EM; Simpson, WT. 2000. Drying hardwood lumber. Ed., USDA Forest Service, Forest Products Laborator, Madison, WI, USA.
- De Souza, A; Simpson, WT; Verril, SP. 1995. Laboratory test for grouping tropical species for kiln drying. *Wood Science and Technology*. 29: 353–362.
- Fuwapi, JA. 1989. Gross heat of combustion of Gmelina (*Gmelina arborea* (Roxb.)) chemical components. *Biomass*. 19: 281-7.
- Gasparovic, L; Korenova, Z; Jelemensky, L. 2010. "Kinetic study of wood chips decomposition by TGA". *Chemical Papers*. 64(2): 174-181.
- Goel, VL; Behl, HN. 1996. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. *Biomass and Bioenergy*. 10(1):57-61.
- González, E; Fisher, R. 1998. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. *Forest Science*. 44: 185-91.
- Henderson, SM; Pabis, S. 1961. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6: 169–174.
- Hukka, A. 1999. The effective diffusion coefficient and mass transfer coefficient of Nordic softwoods as calculated from direct drying experiments. *Holzforschung*. 53:534–540.
- Islam. S; Hamdan. S; Rahman. R; Jusoh. I; Ahmed. AS; Idrus. M. 2011. Dynamic youngs modulus. morphological. and thermal stability of 5 tropical light hardwoods modified by benzene diazonium salt treatment. *BioResources* 6(1): 737-750.
- Jain, RK. 1993. Fuelwood characteristics of some tropical trees of India. *Biomass and Bioenergy*. 4(6): 461-64.

- Jain, RK; Singh, B. 1999. Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Technology*. 68(3): 305-08.
- Kang, W; Kang, CW; Chung, WY; Eom, CD; Yeo, H. 2008. The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood. *Journal of Wood Science*. 54:343–348.
- Kataki, R; Konwer, D. 2002. Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*. 22: 433-37.
- Kataki, R; Konwer, D. 2001. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*. 20(1): 17-23.
- Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; Kumar, R. 2011. An evaluation of fuelwood properties of some aravally mountain tree and shrub species of Western India. *Biomass and Bioenergy*. 35: 411-14.
- Kumar Jain, R. 1992. Fuelwood characteristics of certain hardwood and softwood tree species of India. *Bioresource Technology* 41: 129-133.
- Kumar, R; Pandey, KK; Chandrashekar, N; Mohan, S. 2010. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. *Journal of Forest Resources*. 21: 514-16.
- Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; Kumar, R. 2009. An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian Journal of Energy Enviromental*. 10: 99-107.
- Kumar, M; Gupta, RC; Sharma, T. 1992. Effect of carbonization conditions on the yield and chemical composition of Acacia and Eucalyptus wood chars. *Biomass and Bioenergy*. 3: 411-17.
- Li, X; Zhang, B; Li, W; Li, Y. 2005. Research on the effect of microwave pretreatment on moisture diffusion coefficient of wood. *Wood Science and Technology*. 39:521–528.
- Mckendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 83(1): 37-46
- Mouchot, N; Wehrer, A; Bucur, V; Zoulalian, A. 2000. Indirect determination of tangential and radial steam diffusivity of beech. *Annals Forest Science*. 57:793–801.
- Mouchot, N; Thiercelin, F; Perre, P; Zoulalian, A. 2006. Characterization of diffusional transfers of bound water and water vapor in beech and spruce. *Maderas. Ciencia y tecnologia*. 8:139–147.
- Moya R. 2004. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forest*. 28: 299-317
- Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(3): 317-328.

- Moya, R; Muñoz, F; Dragica, J; Berrocal, A. 2009. Visual identification, physical properties, ash composition, and water diffusion of wetwood in *Gmelina arborea*. *Canadian Journal of Forest Research*. 39: 537-545.
- Moya, R; Ureña, E; Salas, C; Muñoz, F. 2013. Kiln drying defects presence and grouping of Wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. *Wood Material Science and Engineering*. Accepted.
- Mukam, JA; Wanko; C. 2005. Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. *Heat Mass Transfer*. 41: 977–980.
- Murillo, O; Obando, G; Badilla, J; Sánchez, S. 2001. Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. *Biocenosis*. 15(1-2): 66-71.
- Nimmo, W; Daood, SS; Gibbs, BM. 2010. The effect of O₂ enrichment on NO_x formation in biomass co-fired pulverised coal combustion. *Fuel*. 89: 2945-2952.
- Offerman, R; Seidenberger, T; Thrän, D; Kaltschmitt, M; Zinoviev, S; Miertus, S. 2011. Assessment of global bioenergy potentials. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 16: 103-15.
- Ozgur. E; Falcone Miller. S; Miller. BG; Versan Kok. M. 2012. Thermal analysis of co-firing of oil shale and biomass fuels. *Oil Shales* 29(2): 190-201.
- Pang, S; Xu, Q. 2010. Drying of woody biomass for bioenergy using packed moving bed dryer: mathematical modeling and optimization. *Drying Technology*. 28:702-09.
- Pang, S; Li, J. 2006. BIGCC (biomass integrated gasification combined cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. *New Zealand Journal Forest*. 51(2): 7–12.
- Pérez, D; Kanninen, M. 2001. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forests Ecology and Management*. 177: 427-39.
- Petit, B; Montagnini, F. 2004. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forests Ecology and Management*. 199: 243-57.
- Piotto, D; Montagnini, F; Ugalde, L; Kanninen, M. 2003. Performance of forest plantations in small and medium sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. 175: 195-204.
- Poletto. M; Dettenborn. J; Pistor. V; Zeni. M; Zattera. AJ. 2010. Materials produced from plant biomass. Part I: evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. *Materials Research* 13(3): 375-379.
- Purohit, AN; Nautiyal, AR. 1987. Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*. 4: 177-82.
- Ramiah. MV. 1970. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *Journal of applied polymer science* 14: 1323-1337.

- Reuter, MA. 2011. Limits of design for recycling and “Sustainability”: A Review. *Waste Biomass Valor.* 2: 183-208.
- Rosenkilde, A; Glover, P. 2002. High resolution measurement of the surface layer moisture content during drying of wood using a novel magnetic resonance imaging technique. *Holzforschung.* 56:312–317.
- SAS INSTITUTE. SAS/STAT®: user’s guide: version 6.08. Carrey, 1997. v.2, 846p.
- Seifert, K. 1960. Zur frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton-Methode. *Das Papier.* 14: 104-06.
- Senelwa, K; Sims, REH. 1999. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy.* 17:127-40.
- Shanavas, A; Kumar, M. 2003. Fuelwood characteristics of tree species in homegardens of Kerala, India. *Agroforest Systems.* 58: 11-24.
- 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.
- Siau, JF. 1984. *Transport processes in wood.* Springer, Berlin.
- Siau, JF. 1971. *Flow in wood.* Syracuse University Press, Syracuse, NY.
- Simpson, WT. 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of Northern red oak. *Wood Science and Technology* 27:409-420.
- Singh, B; Khanduja, SD. 1984. Wood properties of some firewood shrubs of northern India. *Biomass.* 4: 235-8.
- Sjöström, E. 2003. *Wood chemistry, fundamentals and applications, Second Edition.* Academic Press, New York.
- Skkar. C. 1972. *Water in Wood.* 1 ed. Syracuse University Press. Syracuse. 218 p.
- Stam, AJ. 1959. Bound-water diffusion into wood in the fiber direction. *Forest Products Journal.* 9(1): 27-32.
- TAPPI. 2002. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US. Tappi T 222 om-02 revised 2002. Standart test for acid-insoluble lignin in wood and pulp. Parkway South Norcross, US, TAPPI.
- Tarmian, A; Remond, R; Dashti, H; Perre´, P. 2012. Moisture diffusion coefficient of reaction woods: compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Wood Science Technology.* 46:405–417.
- Tenorio, C; Moya, R. 2011. Kiln drying of *Acacia mangium* Willd wood: considerations of moisture content before and after drying and presence of wet pockets. *Drying Technology.* 29: 1845-1854.

Ulloa, JB; Weerd, JH; Huisman, EA; Verreth, JAJ. 2004. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation. *Waste Management*. 24: 87-97.

Velázquez, B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas*. 15: 77-86.

Wielage, B; Lampke, Th; Mark, G; Nestler, K; Starke, D. 1999. Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibers and polypropylene. *Thermochimica Acta* 337:169-177.

White, RH. 1987. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science*. 19(4): 446-52.

Wood Fuel Standards– Specifications and properties for Wood chip de la unión europea (UNI CEN/TS, 2008.