

DIFUSIÓN DEL AGUA EN ASTILLAS DE MADERA DE DIEZ ESPECIES DE RÁPIDO CRECIMIENTO EN PLANTACIONES EN COSTA RICA

Carolina Tenorio, Róger Moya y Robert Cubero

RESUMEN

En la madera como fuente de energía es importante conocer el coeficiente de difusión (D) del agua dentro de la misma con el fin de conocer su comportamiento durante el secado. El presente trabajo tiene como objetivo determinar el D de astillas de madera de distintas dimensiones para diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica. Se encontró que D está relacionado positivamente con el contenido de humedad (CH) verde y negativamente con peso específico básico (PE) y largo de astillas, y finalmente por el tipo de ma-

dera (albura o duramen). En las especies con albura y duramen (*Gmelina arborea* y *Tectona grandis*) D es mayor en el duramen. En especies con altos CH ($>120\%$), como *Acacia mangium*, *G. arborea* o *Vochysia guatemalensis*, se dan los tiempos de secado más largos. Astillas con 10cm de largo son las que presentan las pérdidas de humedad más lentas, seguidas de las astillas de 7cm y de 5cm de largo. Además, se encontró que en *G. arborea* no se presentó relación de D con el PE y no presentó una tendencia definida de D con el largo de las astillas.

DIFFUSION COEFFICIENT OF WATER IN CHIPS OF TEN FAST GROWING SPECIES IN PLANTATIONS OF COSTA RICA

Carolina Tenorio, Róger Moya and Robert Cubero

SUMMARY

In fuel wood sources it is important to know the water diffusion coefficient (D) behavior during the drying process. The main objective of this work is to measure D in woodchips with different sizes for ten species of fast-growth plantations in Costa Rica. It was found that D is positively related to moisture content (MC) and negatively related to green specific gravity (SG) and woodchip length, and finally the type of wood (sapwood or heartwood). In species with both sapwood and

heartwood (*Gmelina arborea* and *Tectona grandis*) D is higher in heartwood than in sapwood. In species with high MC ($>120\%$), as *Acacia mangium*, *G. arborea* and *Vochysia guatemalensis* longer drying times are found. Woodchips with 10cm in length show slower moisture loss, followed by chips 7cm long and finally 5cm chips. Besides, it was found that *G. arborea* did not show any relationship between SG and D , nor it showed a definite tendency with chip length.

Introducción

Especies de relativo rápido crecimiento (con periodos de rotación de menos de 25 años) han demostrado excelentes crecimientos en plantaciones forestales (Murillo *et al.*, 2001; Pérez *et al.*, 2001; Moya, 2004). Sin embargo, en los procesos de transformación y aserrío de estas maderas se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes

de energía renovable (Andersen *et al.*, 2005; Offerman *et al.*, 2011). La utilización de estos residuos como material energético presenta muchas ventajas. No obstante, es importante indicar que una de las limitantes, en el caso de Costa Rica, es que no se cuenta con una utilización industrial (Ulloa *et al.*, 2004).

Por otro lado, el agua se presenta en dos formas: atada y libre. El agua atada es el agua que es absorbida en las

paredes celulares, mientras que el agua libre es el agua que se encuentra en los lúmenes o en las cavidades celulares (Siau, 1971). Durante el secado de estos materiales, el movimiento del agua está limitado por algunos factores entre los que destaca el patrón de corte (Mouchot, 2000; Moya *et al.*, 2009), las características anatómicas (Tarmian *et al.*, 2012), las condiciones ambientales (Simpson, 1993), el contenido de hume-

dad (Simpson, 1993; Cai, 2005), la presencia de albura y duramen (Rosenkilde y Glover, 2002; Moya *et al.*, 2009) y, principalmente, el peso específico (Tarmian *et al.*, 2012).

Así mismo, una forma de conocer el movimiento del agua en la madera es a través de su coeficiente de difusión (D), que describe la velocidad de movimiento de la humedad (libre y atada) a través de la madera, es decir, deter-

PALABRAS CLAVE / Contenido de Humedad / Energía / Madera / Peso Específico / Tiempo de Secado /

Recibido: 21/01/2013. Modificado: 10/02/2014. Aceptado: 14/02/2014.

Carolina Tenorio. Licenciada en Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Investigadora, ITCR, Costa Rica. e-mail: ctenorio@itcr.ac.cr

Róger Moya. Ingeniero. Ph.D., ITCR, Costa Rica. Profesor-Investigador, ITCR, Costa Rica. Dirección: Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. P.O. Box: 159-7050 Cartago, Costa Rica. e-mail: rmoya@itcr.ac.cr

Robert Cubero. Master, ITCR, Costa Rica. Investigador, ITCR, Costa Rica. e-mail: rcubero@itcr.ac.cr

DIFUSÃO DA ÁGUA EM FERPAS DE MADERA DE DEZ ESPÉCIES DE RÁPIDO CRESCIMENTO EM PLANTACÕES NA COSTA RICA

Carolina Tenorio, Róger Moya e Robert Cubero

RESUMO

Na madeira como fonte de energia é importante conhecer o coeficiente de difusão (D) da água dentro da mesma com o fim de conhecer seu comportamento durante a secagem. O presente trabalho tem como objetivo determinar o D de ferpas de madeira de distintas dimensões para dez espécies de plantações florestais de rápido crescimento na Costa Rica. Encontrou-se que D está relacionado positivamente com o teor de umidade (H) verde e negativamente com peso específico básico (PE) e comprimento de ferpas, e finalmente pelo tipo de madeira (alburno

ou cerne). Nas espécies com alburno e cerne (*Gmelina arborea* e *Tectona grandis*) D é maior no cerne. Em espécies com altos H (>120%), como *Acacia mangium*, *G. arborea* o *Vochysia guatemalensis*, se dão os tempos de secagem mais longos. Ferpa com 10 cm de comprimento são as que apresentam as perdas de umidade mais lentas, seguidas das ferpas de 7 cm e de 5 cm de comprimento. Além disso, se encontrou que em *G. arborea* não se encontrou relação de D com o PE e não apresentou uma tendência definida de D com o comprimento das ferpas.

mina la dificultad con la que se mueve la humedad a través de la misma (Li *et al.*, 2005). En muchas operaciones industriales es importante conocer el D de la madera, específicamente en procesos relacionados con el secado de la madera (Cai, 2005). Por otro lado, este coeficiente ofrece una forma útil para estimar el tiempo de secado (Simpson, 1993; Cai, 2005).

La mayoría de estos estudios se han llevado a cabo para determinar el D en madera aserrada (Li *et al.*, 2005; Danvind *et al.*, 2006); sin embargo, existe muy poca literatura orientada a determinar los tiempos de secado y los coeficientes de difusión para astillas de madera utilizadas como fuentes energéticas. Unos de los pocos trabajos existentes es el llevado a cabo por Boszko *et al.* (2007), en el cual utilizaron un secado convectivo de alta temperatura para secar astillas de madera y encontraron que los estudios de este tipo se basan en determinar diversas formas de secado para las astillas.

El presente estudio tiene como objetivo determinar el coeficiente de difusión (D) de astillas de madera de distintas dimensiones (5, 7 y 10cm de largo por 4,5; 6,3 y 10cm de ancho), de 10 especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica, así como conocer el efecto del peso específico

básico y del contenido de humedad sobre D en estas especies. Estos resultados permitirán optimizar los tiempos de secado necesarios para utilizar estas astillas como fuentes energéticas.

Metodología

Material utilizado y muestreo

Diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica fueron utilizadas. El intervalo de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. En la Tabla I se presentan las especies estudiadas con información de sus dimensiones, 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 fue cortada una troza de 1,25m en la base del árbol hasta la altura del pecho (DAP) y ésta fue pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Patrón de corte

De cada troza extraída del árbol fueron cortadas secciones transversales con espesores de 10, 7 y 5cm (Figura 1a), 3-4 secciones de cada espesor. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad y, luego, de la sección de albura fueron extraídas astillas con cada uno de los siguientes an-

chos: 10; 6,3 y 4,5cm; (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 (UNICEN/TS, 2005). Así mismo, en las especies que presentaron albura y duramen (*G. arborea* y *T. grandis*) fueron cortadas astillas de los dos tipos de madera e igualmente se obtuvieron cinco astillas de cada ancho y largo. Las astillas fueron cortadas con la ayuda de un cuchillo, colocado en la cara transversal y haciendo un corte en el sentido longitudinal, con el fin de obtener un corte similar al de un astillador. La cantidad de astillas para cada tipo de madera fue de 135 unidades (3 árboles \times 3 largos \times 3 anchos \times 5 muestras).

TABLA I
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
<i>Tectona grandis</i>	Albura	9	509	14,99	20,50	0,49	121,80
	Duramen						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

Contenido de humedad en verde y peso específico

El contenido de humedad (CH) es la humedad que presenta la madera en el momento del su derribo, comúnmente denominado como humedad en verde, el cual fue determinado con las astillas cortadas de las trozas (Figura 1b). Éstas fueron pesadas en el momento del corte; cuando finalizó la prueba de difusión, las astillas fueron colocadas por 24h en un horno a 103°C con circulación de aire forzado, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2003a). La humedad se calculó con la Eq. 1. Para la determinación del peso específico básico (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 (ASTM, 2003b). Para cada una de las propiedades de CH y peso específico (PE), se tomaron 135 muestras para las maderas de albura y de duramen, en el caso de que se presentaran estos dos tipos de madera.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} \times 100$$

(1) Una vez obtenido este peso

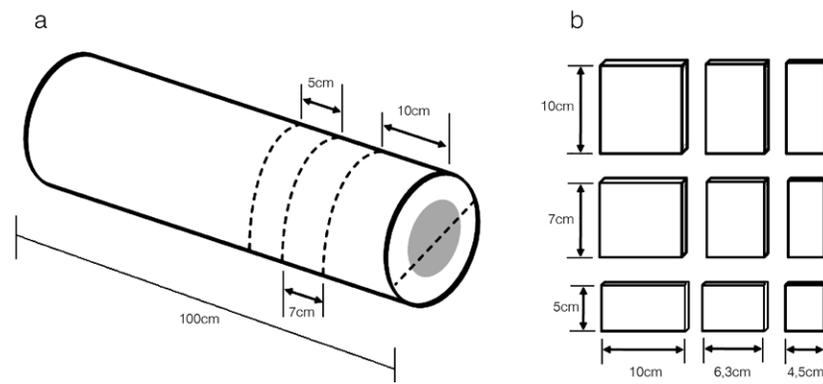


Figura 1. Patrón de corte utilizado para obtener astillas para la prueba de difusión (a) y dimensiones de las astillas (b)

Difusión de la humedad

Las astillas obtenidas en el muestreo fueron pesadas para determinar su peso verde o inicial, posteriormente se colocaron dentro de un horno a temperatura de 75°C, y fueron pesadas cada 60min o cada 30min, hasta obtener un peso constante. El primer rango de tiempo (60min) fue aplicado en especies con más de 100% de humedad y el periodo más corto (30min) se utilizó en las especies con CH <100%.

constante, el horno se programó a un temperatura de 103°C durante ~12h para obtener el peso seco. El coeficiente de difusión (D) fue calculado a 15% utilizando la Eq. 2.

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

donde L: longitud de la muestra en la dirección de transporte del agua (mm), t: tiempo de secado (s), E_t : cambio relativo en el contenido de humedad de la madera de verde a seco (15% en contenido de humedad), y π : 3,1415926.

Análisis estadísticos

Se hizo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para los coeficientes de difusión 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. Primero se graficó la variación del contenido de humedad con relación al tiempo. En dicha relación el valor de CH se transformó al logaritmo natural y el tiempo se mantuvo sin transformar, con el fin de visualizar mejor las diferencias entre las dimensiones de la astillas. Posteriormente se llevó 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 coeficiente de difusión, como variable dependiente, y el contenido de humedad y peso específico, como variables independientes.

Resultados

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 2). Las astillas de 10cm de

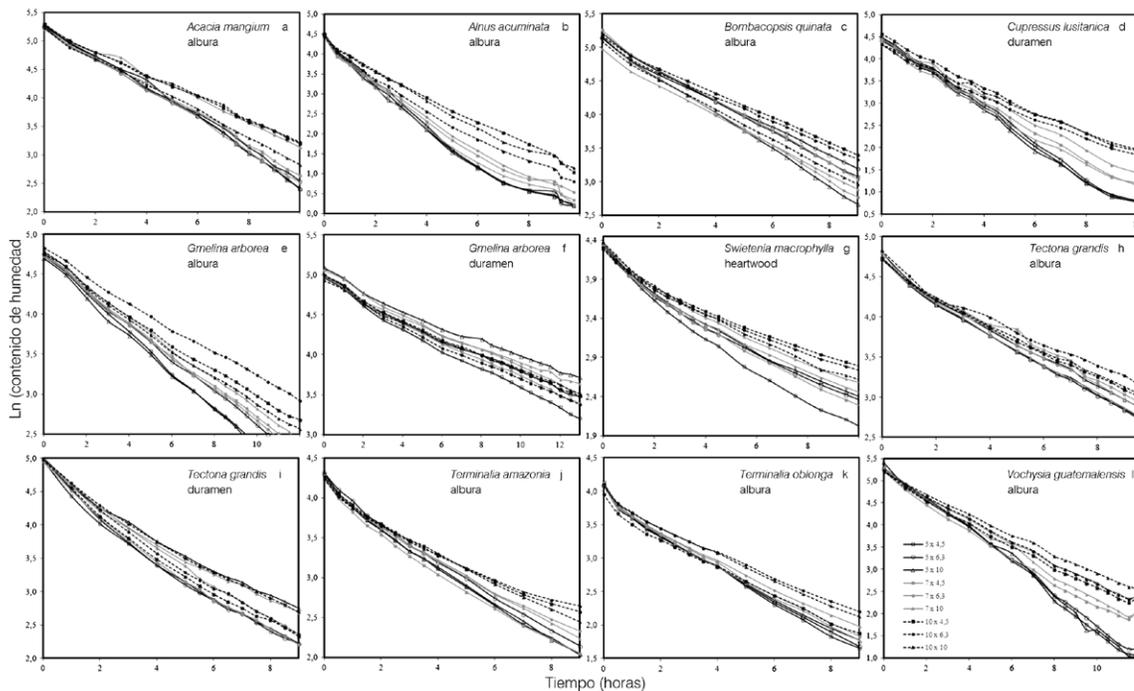


Figura 2. Variación del contenido de humedad en relación al tiempo de astillas de diferente dimensión para 10 especies de plantación.

largo en los diferentes anchos (4,5; 6,3 y 10cm) fueron las que presentaron las pérdidas de humedad más lentas, seguidas de las astillas de 7cm de largo y finalmente con pérdidas de humedad más rápidas las astillas de 5cm de largo (Figura 2). Únicamente el duramen de *G. arborea*, presentó un comportamiento distinto: las astillas de 5 y 7cm para el ancho de 10cm, presentaron las pérdidas de humedad más lentas (Figura 2f). Con respecto a los anchos en las astillas, en ninguna de las especies se observó una tendencia clara para establecer cuál ancho perdió humedad más rápidamente (Figura 2).

Otro resultado de interés fue que especies como *A. mangium*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* y *C. lusitanica* requirieron más tiempo para perder su humedad con relación a las demás especies (*A. acuminata*, *B. quinata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*). El primer grupo de especies necesitó ~10h (Figura 2d, e, f, l), mientras que el segundo requirió entre 8 y 10h (Figura 2a, b, c, g, h, i, j, k). Por otro lado, *A. mangium*, *B. quinata* y *V. guatemalensis* presentaron los contenidos de humedad más altos ($\ln CH > 5\%$), y *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga*, los más bajos ($CH < 5\%$).

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 presentó una pérdida de humedad más rápida (10h) que la madera de duramen (>12h), y además se observó que la madera de duramen ($\ln CH > 5\%$ que corresponde a un va-

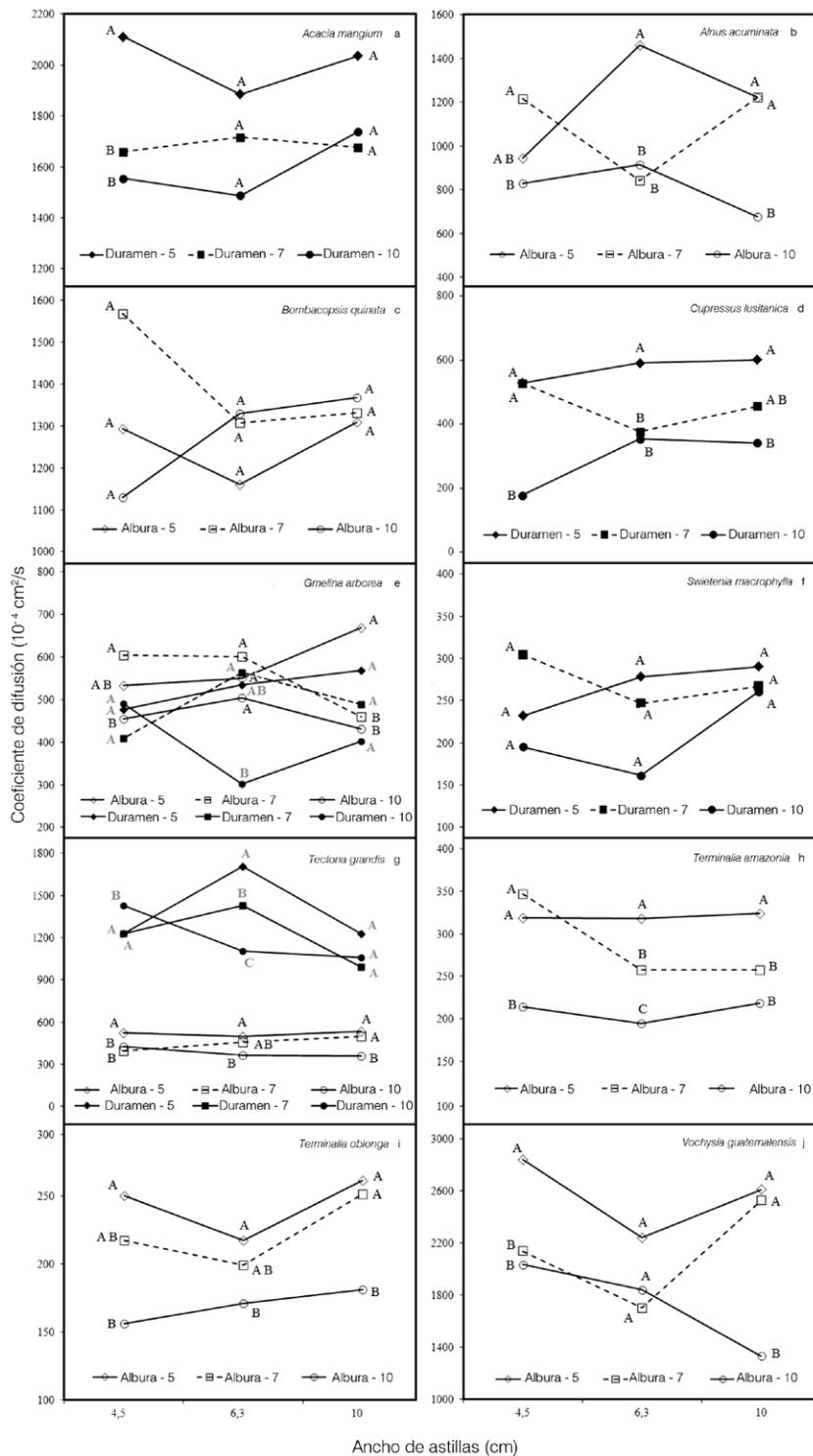


Figura 3. Coeficientes de difusión de las diferentes dimensiones de astillas para 10 especies de plantaciones forestales. Letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

lor de 143%) tuvo un CH más alto que la de albura ($\ln CH < 5\%$ que corresponde a un 113%) (Figura 2e, f). Para *T. grandis* no se observaron diferencias en cuanto al tiempo de pérdida de humedad, ambas

especies requirieron de un tiempo >8h. Sin embargo, al igual que con las astillas de *G. arborea*, la madera de duramen (145%) presentó un CH más alto que la de albura (122%) (Figura 2h, i).

Coefficientes de difusión

La Figura 3 presenta los coeficientes de difusión (D) para cada una de las especies estudiadas y para cada tipo de astilla. *A. mangium* y *V. guatemalensis* presentaron los coeficientes de difusión más altos con valores de 1504 a $2162 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, y de 1326 a $2790 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Por el contrario los coeficientes más bajos los presentaron *S. macrophylla* con valores de 162 a $300 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, y *T. oblonga* con valores de 159 a $266 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 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 de albura (Figura 3g) y ii) en *G. arborea* no se observaron diferencias entre los D de duramen y albura (Figura 3e).

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

Relación entre D , CH y PE

Los datos de la Tabla II muestran que la mayor canti-

TABLA II
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			Largo		
		5cm	7cm	10cm	5cm	7cm	10cm
<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 lusitanica</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**	

dad de relaciones se presentaron entre D y CH, y por tanto la menor cantidad de relaciones se presentaron entre D y PE. Así mismo, la relación entre D y el CH fue positiva en las distintas dimensiones de las astillas, mientras que con el PE las relaciones son negativas en todas las especies estudiadas. Se observó que en la madera de *T. grandis* se obtuvo 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 la madera de *T. amazonia*, sólo presentó una relación positiva con el CH para las astillas de 4,5×7cm, y negativa con el PE para las astillas de

10×10cm. En *B. quinata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. oblonga* se presentaron sobre ocho diferentes relaciones entre D y PE o CH, en tanto que el resto de las especies (*A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*) la cantidad de relaciones fue menor a seis (Tabla II).

Discusión

La reducción del CH con tiempo es matemáticamente explicada por una relación exponencial $Y = b \times e^{-a \times CH}$, 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 estudia-

das se presentó este comportamiento, sólo 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 ésta 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*, donde 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 I). Al presentar el duramen mayor cantidad de agua, se hace necesario de un mayor tiempo para la eliminación de ésta 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 del duramen.

Con relación a las dimensiones de las astillas, se observó que los tiempos de pérdida de humedad más bajos se encontraron en las astillas más cortas (5cm) a diferencia de los largos de 7 y 10cm, pero, en relación con los anchos estudiados (4,5; 6,3 y 10cm) 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 1cm. 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 1972, 1984; Skaar 1972). De acuerdo a lo anterior, es poco factible que el movimiento del agua en los diferentes anchos de las astillas utilizados tenga efectos importantes en la variación del secado de éstas, 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 iniciales en las especies tienden a prolongar los tiempos de secado (Denig et al., 2000; Tenorio et al., 2012), lo que coincide con el resultado del presente estudio. Las especies con altos CH iniciales, 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 I); sin embargo, se observó que presentó 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, las cuales tienden a requerir menos tiempos para pérdida de humedad en relación con las otras especies de tipo la-

tifoliadas (*A. acuminata*, *T. amazonia* y *T. oblonga*). Estas diferencias se dan porque el movimiento del agua en las coníferas tiene lugar a través de puntuaciones pequeñas y de radios uniseriados, mientras que en las latifoliadas se realiza por medio de los vasos y, además, éstas poseen radios multiseriados, lo que provoca que el movimiento de la humedad sea rápido (Skaar, 1972).

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 $30500 \times 10^{-11} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ con una temperatura de 30°C, valores inferiores a los encontrados para las 10 especies de este estudio, usando 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.

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 no 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 5cm de largo, ya que este tipo de astilla presenta un valor de D más alto en los tres 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 5cm, en comparación con 7 y 10cm. Mukam *et al.* (2005) confirman estos resultados al determinar que el D longitudinal es 10-15 veces mayor que el D 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 II). Se encontró que la correlación entre estos dos parámetros se evidencia con los resultados de la Figura 3, donde *A. mangium* y *V. guatemalensis*, las especies de mayor CH, son las que poseen los D más altos. Simpson (1993) demostró que los valores de D aumentan en forma exponencial con el CH, lo que significa que especies de altos CH iniciales presentan altos D. También se observó una relación negativa con el peso específico, lo que significa que el D tiende a disminuir conforme aumenta el peso específico de las especies. Para *T. grandis* fue posible observar que las variaciones que presenta la especie en cuanto a CH y PE, están altamente relacionadas con el D sin importar las dimensiones de las astillas. Situación que no se presentó con *G. arborea*, donde únicamente el CH influye en los D. En el caso de *T. amazonia*, ni las variaciones de CH ni PE mostraron tener mucha influencia en D, ya que únicamente se presentó una relación positiva con el CH para las astillas de 4,5×7cm, y negativa con el PE para las astillas de 10×10cm. Para *B. quinata*, *C. lusitanica* y *S. macrophylla* se puede decir que las variaciones de CH tuvieron una mayor influencia en D que el PE, ya que para estas especies la mayoría de las dimensiones de las astillas tuvieron una relación significativa del CH con D, y no así con PE. Contrario a *T. oblonga*, en la cual las variaciones en PE afectan mayormente a

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, como la estructura anatómica, que no fue contemplada en este estudio.

Conclusiones

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 requirió de un mayor tiempo para eliminar el agua que la madera de albura; ii) al CH: las especies de mayor CH (*A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*) presentaron los tiempos de secado más altos; y iii) las dimensiones de las astillas: las astillas de 5cm de largo perdían la humedad más rápido que las de 7 y 10cm, además no se presentaron ningún tipo de relación del ancho en el tiempo de secado.

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

Basados en los anteriores resultados, las especies de *A.*

mangium, *G. arborea* y *V. guatemalensis* no serían recomendables para la producción de astillas, ya que presentan altos tiempos de secado. Por el contrario, *A. acuminata*, *B. quinata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* presentan los tiempos de secado menores, lo que las hace adecuadas para producir astillas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Virrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo financiero, a los diferentes propietarios de las plantaciones donde se realizó el muestreo y al personal de la finca donde se ubicaban todas las plantaciones muestreadas.

REFERENCIAS

- Andersen R, Towers W, Smith P (2005) Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass Bioenergy* 29: 73-82.
- ASTM (2003a) D 4442-92. Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-base materials In *Annual Book of Standards*. Vol. 04.10. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. EEUU. 6 pp.
- ASTM (2003b) D 143-94. Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of Standards*. Vol. 04.10. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. EEUU. 5 pp.
- Boszko M, Malczewski J, Grabarczyk R (2007) Convective drying of wood chips at high temperature. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 52: 61-62.
- Cai L (2005) Determination of diffusion coefficients for sub-alpine fir. *Wood Sci. Technol.* 39: 153-162.
- Danvind J, Ekevad M (2006) Local water vapor diffusion coefficient when drying Norway spruce sapwood. *Wood Sci. J.* 52: 125-201.
- Denig J, Wengert EM, Simpson WT (2000) *Drying Hardwood Lumber*. Forest Products Laboratory, USDA Forest Service. Madison, WI, EEUU. 178 pp.
- De Souza A, Simpson WT, Verrill SP (1995) Laboratory test for grouping tropical species for

- kiln drying. *Wood Sci. Technol.* 29: 353-362.
- Henderson SM, Pabis S (1961) Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *J. Agric. Eng. Res.* 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.
- Li X, Zhang B, Li W, Li Y (2005) Research on the effect of microwave pretreatment on moisture diffusion coefficient of wood. *Wood Sci. Technol.* 39: 521-528.
- Mouchot N, Wehrer A, Bucur V, Zoulalian A (2000) Indirect determination of tangential and radial steam diffusivity of beech. *Ann. For. Sci.* 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 Cienc. Tecnol.* 8: 139-147.
- Moya R (2004) Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New For.* 28: 299-317
- Moya R, Muñoz F (2008) Wet pockets in kiln dried *Gmelina arborea* lumber. *J. Trop. For. Sci.* 22: 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*. *Can. J. For. Res.* 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 Mat. Sci. Eng.* 8: 37-45.
- Mukam JA, Wanko C (2005) Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. *Heat Mass Transf.* 41: 977-980.
- Murillo O, Obando G, Badilla J, Sánchez S (2001) Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. *Biocenosis* 15: 66-71.
- Offerman R, Seidenberger T, Thrän D, Kaltschmitt M, Zinoviev S, Miertus S (2011) Assessment of global bioenergy potentials. *Mit. Adap. Strat. Global Change* 16: 103-115.
- Pérez D, Kanninen M (2001) Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *For. Ecol. Manag.* 177: 427-39.
- 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.
- Siau JF (1984) *Transport Processes in Wood*. Springer. Berlín, Alemania. 260 pp.
- Siau JF (1971) *Flow in Wood*. Syracuse University Press. Syracuse, NY, EEUU. 131 pp.
- Simpson WT (1993) Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of Northern red oak. *Wood Sci. Technol.* 27: 409-420.
- Skaar C (1972) *Water in Wood*. Syracuse University Press. Syracuse, NY, EEUU. 218 pp.
- 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 Sci. Technol.* 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 Technol.* 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 Manag.* 24: 87-97.
- UNI CEN/TS (2005) *Standards - Specifications and properties for Wood chip of European Union*. Bruselas, Bélgica. 7 pp.