

PARÁMETROS DE HUMEDAD DE 63 MADERAS LATIFOLIADAS MEXICANAS EN FUNCIÓN DE SU DENSIDAD BÁSICA

J. C. Tamarit-Urias¹; M. Fuentes-Salinas²

¹Investigador del INIFAP CIR-Centro, Campo Experimental San Martínito, km 56.5 Carretera Federal México-Puebla C.P. 74100 Tlahuapan, Puebla. Correo-e: tamarit.juan@inifap.gob.mx

²Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, km. 36.5 Carretera México-Texcoco C.P. 56230 Chapingo, México. Correo-e: mariofusa@yahoo.com.mx

RESUMEN

La madera es un material higroscópico ya que tiene la propiedad de aumentar o disminuir su contenido de humedad en relación directa con los cambios de humedad relativa, es anisotrópica por que sus cambios dimensionales son diferentes según sea la dirección tangencial, radial o longitudinal. Sus propiedades son afectadas debido a cambios en su contenido de humedad. Conocer y entender los parámetros de humedad es importante en los procesos de secado e impregnación para obtener una materia prima de calidad en la elaboración de productos. El objetivo del presente trabajo fue determinar los modelos que interpretan el comportamiento de 63 maderas latifoliadas mexicanas respecto a las correlaciones entre la densidad básica (DB) y los parámetros de humedad, siendo estos el punto de saturación de la fibra (PSF), contenido de humedad libre (CHL) y máximo contenido de humedad (MCH). En un rango de DB de 1.05 a 0.29 g·cm⁻³, se encontró que el PSF estimado varía del 13 a 38 %, en tanto que el ajustado tiene un comportamiento logarítmico y varía del 15 a 35 %. El CHL estimado varía del 9 a 243 % y el ajustado presenta un comportamiento exponencial variando del 14 a 238 %. El MCH estimado varía del 29 a 279 % y el ajustado exhibió un comportamiento exponencial variando del 28 a 250 %. Estos mismos parámetros de humedad expresados en l·m⁻³ presentaron el siguiente comportamiento el PSF estimado varía de 219 a 86 l·m⁻³, en tanto que el ajustado tiene un comportamiento polinomial de tercer grado y varía de 215 a 96 l·m⁻³. El CHL estimado varía de 94 a 707 l·m⁻³ en tanto que el ajustado presenta un comportamiento lineal y varía de 128 a 699 l·m⁻³. Por su parte el MCH estimado varía del 313 a 810 l·m⁻³, mientras que el MCH ajustado exhibió un comportamiento lineal con el mismo intervalo de variación.

PALABRAS CLAVE: madera, contenido de humedad, punto de saturación de la fibra, máximo contenido de humedad.

MOISTURE PARAMETERS IN 63 MEXICAN BROADLEAF SPECIES AS A FUNCTION OF WOOD DENSITY

SUMMARY

Wood is a hygroscopic material, which loses and gains moisture as a result of changes in relative humidity. Wood is an anisotropic material; that is, its dimensional change is different in tangential, radial and longitudinal directions. All the properties in wood are greatly affected by the fluctuations in the quantity of water present; therefore, determination and understanding of moisture parameters of wood is important in drying, preservation and other processes to obtain satisfactory performance from wood that is to be processed into different types of products. This study was conducted to determine the correlation between the basic density of the wood in 63 Mexican broadleaf trees and the fiber saturation point (FSP), moisture content of free water (MCF) and maximum moisture content (MMC) parameters. The data of wood density and moisture parameters were adjusted through regression analysis, and the most appropriate models, interrelationship and behavior of these parameters were derived. It was found that the estimated FSP varied between about 13 and 38% for a range in density of 1.05 and 0.29 g·cm⁻³, while the adjusted parameter varied from 15 to 35 % with a logarithmic behavior. For the same interval in density, the estimated MCF varied from 9 to 243%, while the adjusted parameter varied from 14 to 238% with exponential behavior. On the other hand, the estimated MMC varied from 29 to 279%, while the adjusted parameter varied from 28 to 250 % with exponential behavior. The quantity of water expressed in l·m⁻³; this estimated parameter varied from 219 to 86, 94 to 707 and 313 to 810 l·m⁻³ for FSP, MCF and MMC, respectively. Adjusted moisture parameters varied from 215 to 96, 128 to 699 and 313 to 810 l·m⁻³ with a polynomial behavior for FSP and linear for MCF and MMC, respectively.

KEY WORDS: wood, moisture content, fiber saturated point, maximum moisture content.

INTRODUCCIÓN

La madera tiene propiedades y características ingenieriles que la convierten en un material de excelente calidad, es adecuada para la elaboración de una amplia gama de productos y artículos a escala industrial. Sin embargo, debido a que es un material de origen orgánico, tiende a degradarse y, por ser higroscópica es dimensionalmente inestable ya que se expande cuando adsorbe humedad y se contrae cuando la pierde. Pese a esto, el avance y desarrollo de la investigación en tecnología de la madera ha permitido lograr contrarrestar sus desventajas, principalmente mediante el desarrollo de técnicas de secado e impregnación, lo que permite usar la madera con un alto grado de confiabilidad (Vignote y Jiménez, 1996).

El contenido de humedad en árboles vivos puede variar entre 30 y más del 200 % (JUNAC, 1989; Simpson y TenWolde, 1992), tal variación está en función de la especie, condiciones de crecimiento y densidad básica de su madera.

En los procesos industriales de secado e impregnación de la madera, es básico conocer con exactitud los niveles o cantidades de líquido, ya sea de agua o de preservante que puede contener determinado volumen de madera, situación que está directamente relacionada con la densidad básica de la madera que se va a trabajar y con el nivel de contenido de humedad presente al momento de entrar al proceso. La utilización industrial de la madera exige que ésta tenga bajos contenidos de humedad, por lo que es necesario secarla para así transformarla en una materia prima adecuada en diversas aplicaciones industriales e ingenieriles. Un secado correcto de la madera como operación comercial tiene como ventajas un nivel mínimo de defectos, menor tiempo de secado y costos aceptables. Sin embargo, estos factores estarán influidos por la cantidad de agua que es necesario extraer en el proceso; conocer el contenido de humedad inicial de la madera a secar no necesariamente indica la cantidad de agua a extraer, ya que un mismo nivel de contenido de humedad podrá significar cantidades de agua muy diferentes, dependiendo de la densidad básica que caracterice a una determinada madera.

En el proceso de impregnación de la madera, se presentan comportamientos muy variables principalmente en lo que se refiere a la facilidad o dificultad que ésta manifiesta al paso de las sustancias preservadoras, tales comportamientos obedecen a que la estructura anatómica es diferente para cada especie, de tal forma que existen especies muy fáciles clasificadas como permeables y otras altamente difíciles clasificadas como extremadamente resistentes o impermeables (Erdoiza y Castillo, s/f a).

El comportamiento de la madera bajo la acción de un determinado proceso de impregnación, estará en función de la especie, relación albura-duramen, dimensiones,

densidad básica, contenido de humedad y permeabilidad (Erdoiza y Castillo, s/f a; Erdoiza y Castillo, s/f b). Principalmente el contenido de humedad al momento del tratamiento de preservación y la cantidad de extractivos presentes en una especie maderable tienen una marcada influencia sobre la susceptibilidad de impregnación ya que determinan los niveles de absorción, retención y penetración del preservador en la madera. Adicionalmente, se debe considerar el volumen de espacio vacío interno por unidad de volumen externo que caracterice a cada especie de madera, ya que de ello depende el volumen máximo de solución preservante que es capaz de absorber. Conociendo esto, se puede variar la concentración de la solución preservante para que, de acuerdo a la absorción, se logren los niveles de retención óptimos.

Conocer los parámetros de humedad por especie tales como punto de saturación de la fibra, contenido de humedad libre y máximo contenido de humedad, así como tomar en cuenta los factores ya mencionados en los procesos de secado y preservación por parte de los operadores, empresas, vendedores, compradores y usuarios de madera tiene importancia técnica, comercial e industrial, puesto que brinda la posibilidad de formar grupos de especies maderables con características anatómicas, de densidad básica y niveles de humedad similares, además de garantizar un proceso con calidad y eficacia ya que permite el establecimiento de mejores condiciones de operación y obtener materia prima y productos de excelente calidad.

La cantidad de sustancia de pared celular presente en la madera, expresada como densidad básica, es un importante indicador de muchas de las propiedades físicas de la madera, debido a que esta presenta una buena correlación con otras características y propiedades, ha sido ampliamente utilizada en estudios de variación de las propiedades de la madera (Panshin y Zeeuw, 1980). La densidad de la madera no es un valor fijo, por el contrario varía en un rango de 0.16 a 1.04 g·cm⁻³ (Simpson y TenWolde, 1992), tal variación se debe a que la estructura anatómica, contenido de humedad y relación albura/duramen es diferente en cada especie (Eckelman, s/f).

Cuando se estudian las características y propiedades tecnológicas de las maderas, generalmente se hace referencia y usan los modelos matemáticos publicados en la literatura extranjera ya que se cuenta con poca información al respecto para maderas mexicanas. Los valores de las propiedades físicas de una madera, simplemente se determinan y reportan, pero no se interpreta su significado ni implicaciones que tendrán en los procesos de transformación y acondicionamiento, como son el secado, la preservación y el uso de esas maderas.

El objetivo del presente trabajo fue contribuir a la aplicación práctica en los procesos de secado e impregnación de los conocimientos existentes de la relación

entre la madera y el agua de 63 latifoliadas mexicanas, mediante la determinación del nivel de correlación y la generación de los modelos de ajuste entre la densidad básica y los parámetros de humedad, así como definir los rangos de variación de tales parámetros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente análisis, se usó la información tecnológica publicada de la madera de 63 especies latifoliadas mexicanas tomada de Bárcenas (1985) y Fuentes (1998), sin incluir al grupo de los encinos, se utilizaron solamente los datos de densidad básica (DB) definida como la relación peso anhidro (Po) entre su correspondiente volumen verde (Vv) expresada en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y de contracción volumétrica total (bV_t). A partir de ellos, para cada madera se generaron los demás valores expresados tanto en por ciento (%) como en $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$ aplicando las metodologías propuestas por Fuentes (2000) y JUNAC (1998). Los parámetros de humedad que se determinaron fueron:

Punto de Saturación de la Fibra (PSF), entendido éste como el contenido de humedad de la madera en donde sus fibras contienen toda el agua higroscópica pero nada de agua libre, cuya principal característica es que cuando se presenta la pérdida del agua higroscópica también se presenta contracción y pérdida de peso. Para su estimación se empleó la fórmula:

$$PSF = \frac{\beta V_t}{(DB) (0.9)} \quad \text{Ec. 1}$$

Máximo Contenido de Humedad (MCH), se refiere a la cantidad de agua máxima que una madera es capaz de contener, es decir, que tanto la pared celular como los lúmenes se encuentran completamente saturados de agua. Para su estimación se empleó la fórmula:

$$MCH = \left(\frac{(1.53) - (DB)}{(1.53) (DB)} \right) 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Contenido de Humedad Libre (CHL), se refiere a la cantidad de agua que la madera contiene exclusivamente en las cavidades o lúmenes de las células. Cuando ésta se pierde solo se presenta reducción de su peso. Por diferencia entre el máximo contenido de humedad y el punto de saturación de la fibra se estimó el contenido de humedad libre.

Con base en la densidad básica, para cada especie también se determinó el porcentaje de pared celular (PC) y de espacios vacíos (EV), para lo cual se utilizaron las fórmulas siguientes:

$$PC = \left(\frac{DB}{1.53} \right) 100 \quad \text{Ec. 3}$$

$$EV = \left(1 - \frac{DB}{1.53} \right) 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Para cada correlación se ensayaron varios modelos de tipo lineal, logarítmico, polinomial, exponencial y potencial. Se seleccionó como el mejor aquel cuyo valor del coeficiente de correlación (r^2) fue más alto. Se graficaron y se obtuvieron los rangos de variación para cada parámetro de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los coeficientes de correlación resultantes de las correlaciones entre la densidad básica de las maderas y sus parámetros de humedad, se seleccionaron los modelos que se presentan en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Modelos derivados de la correlación entre la densidad básica y los parámetros de humedad.

Correlación	Modelo	r^2
DB - bV_t	$y = 15.199x^3 - 23.721x^2 + 22.572x + 4.1332$	0.8079
DB - PSF (%)	$y = -15.23\ln(x) + 16.414$	0.5022
DB - CHL (%)	$y = 687.47e-3.6567x$	0.9748
DB - MCH (%)	$y = 570.64e-2.8416x$	0.9969
DB - PSF (l/m^3)	$y = 894.25x^3 - 1713.7x^2 + 1120.1x - 106.07$	0.3662
DB - CHL (l/m^3)	$y = -750.59x + 916.78$	0.9643
DB - MCH (l/m^3)	$y = -653.59x + 1000$	0.9999

Contracción volumétrica total (bV_t). En los Cuadros 1 y 2 y Figura 1, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene la contracción volumétrica total con respecto a la densidad básica, se observa que al aumentar la densidad básica de la madera en un rango de 0.29 a 1.05 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, la contracción volumétrica total manifiesta un aumento con un rango de variación del 7 al 19 % en tanto que los valores de contracción ajustados manifiestan un comportamiento polinomial de tercer grado y varían del 8 al 19 %.

En este sentido, Kollmann y Côté (1968) señalan la misma tendencia de que maderas con mayor densidad también presentan mayor contracción; sin embargo, reportan una relación lineal entre ambas variables y explican que las variaciones se deben a diferentes concentraciones de extractivos solubles en agua y a fuertes esfuerzos que sufre la madera en su interior al perder humedad. Panshin y Zeeuw (1980) por su parte argumentan que la correlación

CUADRO 2. Valores de densidad básica y contracción volumétrica total de 63 maderas mexicanas.

Especie	Densidad básica (g·cm ⁻³)	Contracción Volumétrica Total (%) Reportada	Contracción Volumétrica Total (%) Ajustada	Pared Celular (%)	Espacios Vacíos (%)
<i>Ceiba pentandra</i>	0.29	9.30	8.68	18.95	81.05
<i>Schizolobium parahybum</i>	0.30	8.58	8.99	19.61	80.39
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0.35	8.40	10.29	22.88	77.12
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	0.35	7.89	10.29	22.88	77.12
<i>Cedrela odorata</i>	0.36	12.38	10.51	23.53	76.47
<i>Sterculia apetala</i>	0.38	9.50	10.91	24.84	75.16
<i>Alchornea latifolia</i>	0.39	11.20	11.09	25.49	74.51
<i>Alnus jurullensis</i>	0.40	13.93	11.25	26.14	73.86
<i>Cibistax donell-smithii</i>	0.40	9.10	11.25	26.14	73.86
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	0.40	12.92	11.25	26.14	73.86
<i>Dendropanax arboreus</i>	0.40	13.90	11.25	26.14	73.86
<i>Bursera simaruba</i>	0.41	10.20	11.41	26.80	73.20
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.42	9.10	11.55	27.45	72.55
<i>Guatteria anomala</i>	0.43	13.65	11.68	28.10	71.90
<i>Vochysia ondurensis</i>	0.43	12.20	11.68	28.10	71.90
<i>Poulsenia armata</i>	0.45	11.54	11.92	29.41	70.59
<i>Pterocarpus hayesii</i>	0.45	15.81	11.92	29.41	70.59
<i>Simarouba glauca</i>	0.46	11.43	12.03	30.07	69.93
<i>Quararibea funebris</i>	0.48	11.83	12.21	31.37	68.63
<i>Spondias mombin</i>	0.49	13.48	12.29	32.03	67.97
<i>Blepharidium mexicanum</i>	0.50	12.46	12.36	32.68	67.32
<i>Nectandra</i> sp.	0.51	15.85	12.43	33.33	66.67
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	0.51	9.50	12.43	33.33	66.67
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	0.52	7.74	12.49	33.99	66.01
<i>Guarea glabra</i>	0.53	10.20	12.54	34.64	65.36
<i>Pachira acuatica</i>	0.53	15.96	12.54	34.64	65.36
<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.55	13.14	12.63	35.95	64.05
<i>Cordia alliodora</i>	0.55	13.49	12.63	35.95	64.05
<i>Talauma mexicana</i>	0.55	12.78	12.63	35.95	64.05
<i>Acer saccharum</i>	0.56	14.90	12.67	36.60	63.40
<i>Vatairea lundellii</i>	0.56	11.87	12.67	36.60	63.40
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	0.58	11.33	12.74	37.91	62.09
<i>Platymiscium yucatanum</i>	0.61	11.32	12.83	39.87	60.13
<i>Sebastiania longicuspis</i>	0.61	10.54	12.83	39.87	60.13
<i>Licania platypus</i>	0.62	14.72	12.85	40.52	59.48
<i>Terminalia amazonia</i>	0.62	13.30	12.85	40.52	59.48
<i>Andira inermis</i>	0.63	10.60	12.87	41.18	58.82
<i>Brosimum aliscastrum</i>	0.63	13.24	12.87	41.18	58.82
<i>Lysiloma bahamensis</i>	0.63	9.91	12.87	41.18	58.82
<i>Ampelocera hottlei</i>	0.64	11.63	12.90	41.83	58.17
<i>Misanteca pekii</i>	0.65	13.62	12.92	42.48	57.52
<i>Sickingia salvadorensis</i>	0.66	17.18	12.94	43.14	56.86
<i>Vitex gaumeri</i>	0.66	12.60	12.94	43.14	56.86
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	0.67	12.73	12.97	43.79	56.21
<i>Piscidia comunis</i>	0.68	9.90	12.99	44.44	55.56
<i>Mirandaceltis monoica</i>	0.69	13.59	13.02	45.10	54.90
<i>Pithecollobium arboreum</i>	0.70	11.78	13.05	45.75	54.25
<i>Zuelania guidonia</i>	0.70	14.35	13.05	45.75	54.25
<i>Maclura tinctoria</i>	0.71	8.80	13.09	46.41	53.59
<i>Astronium graveolens</i>	0.73	11.28	13.17	47.71	52.29
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	0.73	13.64	13.17	47.71	52.29
<i>Pouteria campechiana</i>	0.73	16.84	13.17	47.71	52.29
<i>Pseudolmedia oxiphyllaria</i>	0.73	16.68	13.17	47.71	52.29
<i>Dialium guianense</i>	0.78	16.41	13.45	50.98	49.02
<i>Aspidosperma megalocarpum</i>	0.80	17.15	13.60	52.29	47.71
<i>Dipholis salicifolia</i>	0.84	14.15	14.01	54.90	45.10
<i>Bucida buceras</i>	0.85	9.60	14.14	55.56	44.44
<i>Manilkara zapota</i>	0.86	16.85	14.27	56.21	43.79
<i>Sweetia panamensis</i>	0.87	15.16	14.42	56.86	43.14
<i>Cordia dodecandra</i>	0.89	11.06	14.75	58.17	41.83
<i>Dipholis stevensonii</i>	0.97	16.31	16.58	63.40	36.60
<i>Bucida macrostachya</i>	1.02	18.59	18.23	66.67	33.33
<i>Swartzia cubensis</i>	1.05	19.71	19.43	68.63	31.37

entre la densidad y los cambios dimensionales no es consistente toda vez que la primera es sólo un indicador aproximado de tales cambios. Haygreen y Bowyer (1996) en tanto indican que la cantidad de contracción es generalmente proporcional a la cantidad de agua eliminada de la pared celular.

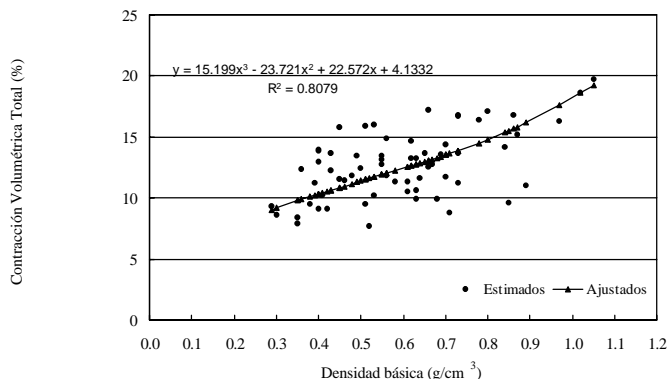


Figura 1. Correlación entre la densidad básica y la contracción volumétrica total.

Punto de Saturación de la Fibra (PSF). En los Cuadros 1 y 3 y Figura 2a, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene el PSF expresado en porcentaje con respecto a la densidad básica, se observa que al aumentar la densidad básica de la madera en un rango de 0.29 a 1.05 g·cm⁻³, el PSF manifiesta un decremento con un rango de variación de los valores estimados del 38 al 13 %, por su parte, los valores del PSF ajustados manifiestan un comportamiento logarítmico y varían del 35 al 15 %.

Para este parámetro de humedad, el nivel de correlación encontrado con respecto a la densidad básica fue relativamente bajo comparativamente con los modelos obtenidos para las otras variables. Tal situación puede explicarse al hecho de que el PSF sobre todo en especies latifoliadas tropicales que es el grupo mayormente aquí estudiado presenta un rango de variación amplio toda vez que de acuerdo con Haygreen y Bowyer (1996) y Panshin y Zeeuw (1980) quienes señalan que tal variación es debida a la presencia, cantidad, tamaño y tipo de extractivos, toda vez que éstos ocupan sitios dentro de la pared celular limitando así la atracción entre las moléculas de agua y la madera, en donde especies con alto contenido de extractivos tienen un PSF relativamente bajo.

Por su parte, la variación de la densidad de la madera entre diferentes especies se debe principalmente a factores tales como calidad de sitio, clima, altitud, latitud, composición y espaciamiento de especies en el bosque, de tal forma que la disponibilidad de humedad, luz, nutrientes y el efecto del viento y la temperatura influyen en el tamaño y espesor de la pared celular y por tanto afectan su densidad. Del mismo modo, los extractivos y

los materiales inorgánicos afectan la densidad, toda vez que los primeros pueden representar del 3 al 30 % del peso seco de la madera dependiendo de la especie (Haygreen y Bowyer, 1996).

Puesto que el PSF varía en función de la estructura y la composición química, Kollmann y Côté (1968), reportan para maderas latifoliadas nativas de la USA un rango de variación del PSF de 22 a 35 % y señalan que maderas extremadamente ligeras pueden llegar a tener un PSF de hasta el 50 %, por su parte Haygreen y Bowyer (1996) reportan valores de hasta 15 %, lo que coincide con el rango de variación encontrado para el grupo de las especies latifoliadas mexicanas estudiadas.

Contenido de Humedad Libre (CHL). Además del agua higroscópica, es posible conocer el porcentaje de agua libre, valor que en los procesos de impregnación representaría el máximo de solución preservante que es capaz de absorber una madera y que en los procesos de secado representa el agua que se puede eliminar por capilaridad sin el requerimiento de elevada energía (Fuentes, s/f).

En los Cuadros 1 y 3 y Figura 2b para el grupo de maderas mexicanas analizadas, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene el CHL expresado en porcentaje con respecto a la densidad básica, se determinó que al aumentar la densidad básica de la madera en un rango de 0.29 a 1.05 g·cm⁻³, el CHL manifiesta un decremento con un rango de variación de los valores estimados del 243 al 9 %. Por su parte, los valores ajustados manifiestan un comportamiento exponencial y varían del 238 al 14 %. Este comportamiento y variación es explicada por las mismas razones que para el caso del PSF, es decir, por la influencia de los extractivos en donde incluso algunos pueden llegar a estar en solución o suspensión en el agua que se encuentra en los lúmenes de las células sobre todo del duramen.

Se infiere que el agua libre al encontrarse en los lúmenes de las células está fuertemente influida por el volumen de espacios vacíos, por lo que a mayor proporción de éstos mayor es la cantidad de agua libre que una determinada especie pueda contener, de tal forma que puede llegar a representar un peso de hasta cuatro veces mayor que el de la sustancia madera (Cuadro 2).

Máximo Contenido de Humedad (MCH). Este parámetro de humedad al igual que el anterior resultó ser altamente dependiente de la densidad básica. En los Cuadros 1 y 3 y Figura 2c, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene el MCH expresado en porcentaje con respecto a la densidad básica. Los valores de este parámetro manifiestan una relación inversamente proporcional al valor de la densidad básica ya que al aumentar la densidad básica de la madera en un rango de

CUADRO 3. Parámetros de humedad en porciento estimados y ajustados de 63 maderas mexicanas.

Especie	Parámetros de humedad (%)						
	Estimado				Ajustado		
	DB	PSF	CHL	MCH	PSF	CHL	MCH
<i>Ceiba pentandra</i>	0.29	35.63	279.47	243.84	35.27	250.31	238.07
<i>Schizolobium parahybum</i>	0.30	31.78	267.97	236.20	34.75	243.30	229.52
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0.35	26.67	220.35	193.69	32.40	211.07	191.17
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	0.35	25.05	220.35	195.31	32.40	211.07	191.17
<i>Cedrela odorata</i>	0.36	38.21	212.42	174.21	31.97	205.16	184.31
<i>Sterculia apetala</i>	0.38	27.78	197.80	170.02	31.15	193.82	171.31
<i>Alchornea latifolia</i>	0.39	31.91	191.05	159.14	30.75	188.39	165.16
<i>Alnus jurullensis</i>	0.40	38.69	184.64	145.95	30.37	183.12	159.23
<i>Cibistax donell-smithii</i>	0.40	25.28	184.64	159.36	30.37	183.12	159.23
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	0.40	35.89	184.64	148.75	30.37	183.12	159.23
<i>Dendropanax arboreus</i>	0.40	38.61	184.64	146.03	30.37	183.12	159.23
<i>Bursera simaruba</i>	0.41	27.64	178.54	150.90	29.99	177.99	153.51
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.42	24.07	172.74	148.66	29.63	173.00	148.00
<i>Guatteria anomala</i>	0.43	35.27	167.20	131.93	29.27	168.15	142.68
<i>Vochysia ondurensis</i>	0.43	31.52	167.20	135.67	29.27	168.15	142.68
<i>Poulsenia armata</i>	0.45	28.49	156.86	128.37	28.58	158.86	132.62
<i>Pterocarpus hayesii</i>	0.45	39.04	156.86	117.83	28.58	158.86	132.62
<i>Simarouba glauca</i>	0.46	27.61	152.03	124.42	28.24	154.41	127.86
<i>Quararibea funebris</i>	0.48	27.38	142.97	115.59	27.59	145.88	118.84
<i>Spondias mombin</i>	0.49	30.57	138.72	108.16	27.28	141.79	114.58
<i>Blepharidium mexicanum</i>	0.50	27.69	134.64	106.95	26.97	137.82	110.46
<i>Nectandra sp.</i>	0.51	34.53	130.72	96.19	26.67	133.96	106.50
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	0.51	20.70	130.72	110.02	26.67	133.96	106.50
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	0.52	16.54	126.95	110.41	26.37	130.21	102.67
<i>Guarea glabra</i>	0.53	21.38	123.32	101.94	26.08	126.56	98.98
<i>Pachira acuatica</i>	0.53	33.46	123.32	89.86	26.08	126.56	98.98
<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.55	26.55	116.46	89.91	25.52	119.57	92.00
<i>Cordia alliodora</i>	0.55	27.25	116.46	89.21	25.52	119.57	92.00
<i>Talauma mexicana</i>	0.55	25.82	116.46	90.64	25.52	119.57	92.00
<i>Acer saccharum</i>	0.56	29.56	113.21	83.65	25.24	116.22	88.70
<i>Vatairea lundellii</i>	0.56	23.55	113.21	89.66	25.24	116.22	88.70
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	0.58	21.70	107.05	85.35	24.71	109.80	82.45
<i>Platymiscium yucatanum</i>	0.61	20.62	98.57	77.96	23.94	100.82	73.88
<i>Sebastiania longicuspis</i>	0.61	19.20	98.57	79.38	23.94	100.82	73.88
<i>Licania platypus</i>	0.62	26.38	95.93	69.55	23.69	98.00	71.23
<i>Terminalia amazonia</i>	0.62	23.84	95.93	72.10	23.69	98.00	71.23
<i>Andira inermis</i>	0.63	18.69	93.37	74.68	23.45	95.25	68.67
<i>Brosimum aliscastrum</i>	0.63	23.35	93.37	70.02	23.45	95.25	68.67
<i>Lysiloma bahamensis</i>	0.63	17.48	93.37	75.89	23.45	95.25	68.67
<i>Ampelocera hottlei</i>	0.64	20.19	90.89	70.70	23.21	92.59	66.20
<i>Misanteca pekii</i>	0.65	23.28	88.49	65.20	22.97	89.99	63.83
<i>Sickingia salvadorensis</i>	0.66	28.92	86.16	57.23	22.74	87.47	61.53
<i>Vitex gaumeri</i>	0.66	21.21	86.16	64.94	22.74	87.47	61.53
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	0.67	21.11	83.89	62.78	22.51	85.02	59.32
<i>Piscidia comunis</i>	0.68	16.18	81.70	65.52	22.29	82.64	57.19
<i>Mirandaceltis monoica</i>	0.69	21.88	79.57	57.68	22.07	80.32	55.14
<i>Pithecollobium arboreum</i>	0.70	18.70	77.50	58.80	21.85	78.07	53.16
<i>Zuelania guidonia</i>	0.70	22.78	77.50	54.72	21.85	78.07	53.16
<i>Maclura tinctoria</i>	0.71	13.77	75.49	61.71	21.63	75.89	51.25
<i>Astronium graveolens</i>	0.73	17.17	71.63	54.46	21.21	71.69	47.64
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	0.73	20.76	71.63	50.87	21.21	71.69	47.64
<i>Pouteria campechiana</i>	0.73	25.63	71.63	46.00	21.21	71.69	47.64
<i>Pseudolmedia oxiphylaria</i>	0.73	25.39	71.63	46.24	21.21	71.69	47.64
<i>Dialium guianense</i>	0.78	23.38	62.85	39.47	20.20	62.20	39.68
<i>Aspidosperma megalocarpum</i>	0.80	23.82	59.64	35.82	19.81	58.76	36.88
<i>Dipholis salicifolia</i>	0.84	18.72	53.69	34.97	19.07	52.45	31.86
<i>Bucida buceras</i>	0.85	12.55	52.29	39.74	18.89	50.98	30.72
<i>Manilkara zapota</i>	0.86	21.77	50.92	29.15	18.71	49.55	29.61
<i>Sweetia panamensis</i>	0.87	19.36	49.58	30.22	18.53	48.16	28.55
<i>Cordia dodecandra</i>	0.89	13.81	47.00	33.19	18.19	45.50	26.54
<i>Dipholis stevensonii</i>	0.97	18.68	37.73	19.05	16.88	36.25	19.81
<i>Bucida macrostachya</i>	1.02	20.25	32.68	12.43	16.11	31.45	16.50
<i>Swartzia cubensis</i>	1.05	20.86	29.88	9.02	15.67	28.88	14.78

0.29 a 1.05 g·cm⁻³, el MCH disminuye con un rango de variación de los valores estimados del 279 a 29 %, por su parte, los valores ajustados manifiestan un comportamiento exponencial y varían del 250 al 28 %.

La cantidad de agua para este parámetro está limitada por el volumen o espacio vacío, es decir, por el espacio no ocupado por la sustancia de la pared celular, extractivos y componentes inorgánicos. El rango de variación y comportamiento encontrado para este parámetro coincide con lo señalado por Panshin y Zeeuw (1980), Simpson y TenWolde (1992) y Simpson (1993) quienes reportan un rango del MCH de 44 % para maderas pesadas nativas de la USA con densidad de 0.90 g·cm⁻³ a 267 % para maderas ligeras con densidad de 0.30 g·cm⁻³; sin embargo, indican que *Krugiodendron ferrum* (Vahl) Urban con una densidad de 1.18 alcanza un MCH de 26 % y en contraste *Ochroma lagopus* Sw. con una densidad de 0.2 puede llegar a presentar 400 % o más de MCH.

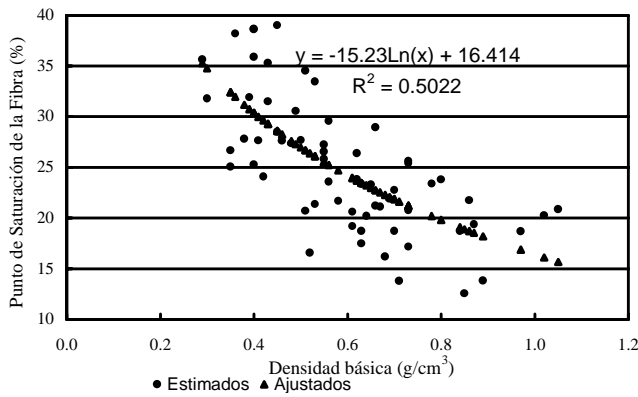
En la Figura 2d, se muestra el comportamiento de los parámetros de humedad expresados en porcentaje con respecto a la densidad básica para el grupo de las 63 maderas latifoliadas mexicanas estudiadas.

Con base en los valores de los parámetros anteriores y dado que éstos se representan en porcentaje, es posible entonces determinar valores cuantitativos, específicamente en litros por metro cúbico (l·m⁻³), que representan cada uno de esos parámetros.

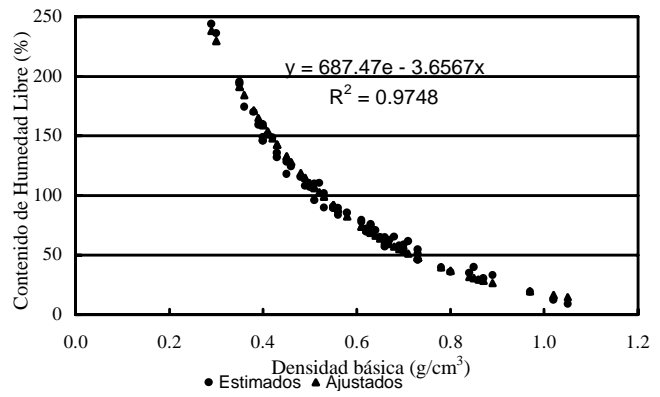
De esta forma, en los Cuadros 1 y 4 y Figura 3a, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene el PSF expresado en l·m⁻³ con respecto a la densidad básica, se observa que al aumentar la densidad básica de la madera en un rango de 0.29 a 1.05 g·cm⁻³, el PSF también aumenta con un rango de variación de los valores estimados de 93 a 219 l·m⁻³, en tanto, los valores del PSF ajustados manifiestan un comportamiento polinomial y varían de 96 a 215 l·m⁻³.

Para este parámetro de humedad, el nivel de correlación encontrado con respecto a la densidad básica fue relativamente bajo comparativamente con los modelos obtenidos para las otras variables. La explicación a tal comportamiento es la misma indicada para este mismo parámetro cuando es expresado en porcentaje.

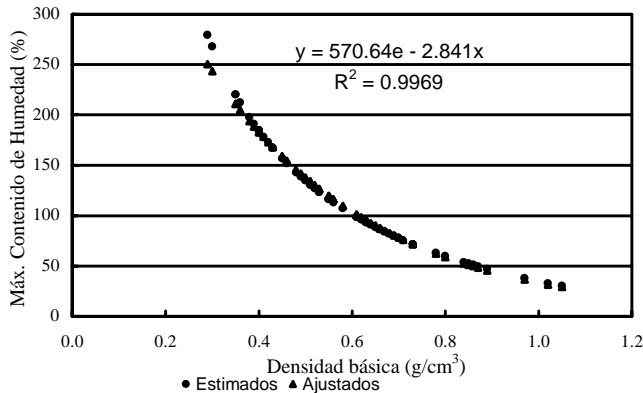
En los Cuadros 1 y 4 y Figura 3b, se muestra el modelo



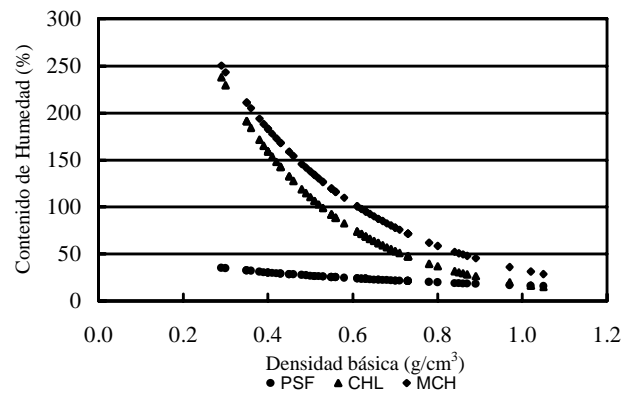
a. Densidad básica – Punto de saturación de la fibra



b. Densidad básica – Contenido de humedad libre



c. Densidad básica – Máximo contenido de humedad



d. Comportamiento de los parámetros de humedad

Figura 2. Correlación de la densidad básica con los parámetros de humedad en porcentaje

CUADRO 4. Parámetros de humedad en l·m⁻³ estimados y ajustados de 63 maderas mexicanas.

Especie	Parámetros de humedad (l·m ⁻³)						
	DB	PSF	Estimado			Ajustado	
			CHL	MCH	PSF	CHL	MCH
<i>Ceiba pentandra</i>	0.29	103.33	810.46	707.12	96.45	810.46	699.11
<i>Schizolobium parahybum</i>	0.30	95.33	803.92	708.59	99.87	803.92	691.60
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0.35	93.33	771.24	677.91	114.38	771.24	654.07
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	0.35	87.67	771.24	683.58	114.38	771.24	654.07
<i>Cedrela odorata</i>	0.36	137.56	764.71	627.15	116.79	764.71	646.57
<i>Sterculia apetala</i>	0.38	105.56	751.63	646.08	121.18	751.64	631.56
<i>Alchornea latifolia</i>	0.39	124.44	745.10	620.65	123.16	745.10	624.05
<i>Alnus jurullensis</i>	0.40	154.78	738.56	583.78	125.01	738.56	616.54
<i>Cibistax donell-smithii</i>	0.40	101.11	738.56	637.45	125.01	738.56	616.54
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	0.40	143.56	738.56	595.01	125.01	738.56	616.54
<i>Dendropanax arboreus</i>	0.40	154.44	738.56	584.12	125.01	738.56	616.54
<i>Bursera simaruba</i>	0.41	113.33	732.03	618.69	126.73	732.03	609.04
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.42	101.11	725.49	624.38	128.33	725.49	601.53
<i>Guatteria anomala</i>	0.43	151.67	718.95	567.29	129.81	718.96	594.03
<i>Vochysia ondurensis</i>	0.43	135.56	718.95	583.40	129.81	718.96	594.03
<i>Poulsenia armata</i>	0.45	128.22	705.88	577.66	132.44	705.88	579.01
<i>Pterocarpus hayesii</i>	0.45	175.67	705.88	530.22	132.44	705.88	579.01
<i>Simarouba glauca</i>	0.46	127.00	699.35	572.35	133.60	699.35	571.51
<i>Quararibea funebris</i>	0.48	131.44	686.27	554.83	135.64	686.28	556.50
<i>Spondias mombin</i>	0.49	149.78	679.74	529.96	136.53	679.74	548.99
<i>Blepharidium mexicanum</i>	0.50	138.44	673.20	534.76	137.34	673.21	541.49
<i>Nectandra sp.</i>	0.51	176.11	666.67	490.56	138.07	666.67	533.98
<i>Pithecollobium leucocalix</i>	0.51	105.56	666.67	561.11	138.07	666.67	533.98
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	0.52	86.00	660.13	574.13	138.74	660.13	526.47
<i>Guarea glabra</i>	0.53	113.33	653.59	540.26	139.34	653.60	518.97
<i>Pachira acuatica</i>	0.53	177.33	653.59	476.26	139.34	653.60	518.97
<i>Calophyllum brasiliense</i>	0.55	146.00	640.52	494.52	140.37	640.53	503.96
<i>Cordia alliodora</i>	0.55	149.89	640.52	490.63	140.37	640.53	503.96
<i>Talauma mexicana</i>	0.55	142.00	640.52	498.52	140.37	640.53	503.96
<i>Acer saccharum</i>	0.56	165.56	633.99	468.43	140.81	633.99	496.45
<i>Vatairea lundellii</i>	0.56	131.89	633.99	502.10	140.81	633.99	496.45
<i>Mosquitoxylum jamaicense</i>	0.58	125.89	620.92	495.03	141.58	620.92	481.44
<i>Platymiscium yucatanum</i>	0.61	125.78	601.31	475.53	142.50	601.31	458.92
<i>Sebastiania longicuspis</i>	0.61	117.11	601.31	484.20	142.50	601.31	458.92
<i>Licania platypus</i>	0.62	163.56	594.77	431.22	142.77	594.77	451.41
<i>Terminalia amazonia</i>	0.62	147.78	594.77	446.99	142.77	594.77	451.41
<i>Andira inermis</i>	0.63	117.78	588.24	470.46	143.03	588.24	443.91
<i>Brosimum aliscastrum</i>	0.63	147.11	588.24	441.12	143.03	588.24	443.91
<i>Lysiloma bahamensis</i>	0.63	110.11	588.24	478.12	143.03	588.24	443.91
<i>Ampelocera hottlei</i>	0.64	129.22	581.70	452.48	143.28	581.70	436.40
<i>Misanteca pekii</i>	0.65	151.33	575.16	423.83	143.54	575.17	428.90
<i>Sickingia salvadorensis</i>	0.66	190.89	568.63	377.74	143.80	568.63	421.39
<i>Vitex gaumeri</i>	0.66	140.00	568.63	428.63	143.80	568.63	421.39
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	0.67	141.44	562.09	420.65	144.07	562.09	413.88
<i>Piscidia comunis</i>	0.68	110.00	555.56	445.56	144.36	555.56	406.38
<i>Mirandaceltis monoica</i>	0.69	151.00	549.02	398.02	144.68	549.02	398.87
<i>Pithecollobium arboreum</i>	0.70	130.89	542.48	411.59	145.01	542.49	391.37
<i>Zuelania guidonia</i>	0.70	159.44	542.48	383.04	145.01	542.49	391.37
<i>Maclura tinctoria</i>	0.71	97.78	535.95	438.17	145.39	535.95	383.86
<i>Astronium graveolens</i>	0.73	125.33	522.88	397.54	146.25	522.88	368.85
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	0.73	151.56	522.88	371.32	146.25	522.88	368.85
<i>Pouteria campechiana</i>	0.73	187.11	522.88	335.76	146.25	522.88	368.85
<i>Pseudolmedia oxiphyllaria</i>	0.73	185.33	522.88	337.54	146.25	522.88	368.85
<i>Dialium guianense</i>	0.78	182.33	490.20	307.86	149.36	490.20	331.32
<i>Aspidosperma megalocarpum</i>	0.80	190.56	477.12	286.57	151.10	477.13	316.31
<i>Dipholis salicifolia</i>	0.84	157.22	450.98	293.76	155.65	450.98	286.28
<i>Bucida buceras</i>	0.85	106.67	444.44	337.78	157.05	444.45	278.78
<i>Manilkara zapota</i>	0.86	187.22	437.91	250.69	158.56	437.91	271.27
<i>Sweetia panamensis</i>	0.87	168.44	431.37	262.93	160.18	431.38	263.77
<i>Cordia dodecandra</i>	0.89	122.89	418.30	295.41	163.82	418.30	248.75
<i>Dipholis stevensonii</i>	0.97	181.22	366.01	184.79	184.16	366.02	188.71
<i>Bucida macrostachya</i>	1.02	206.56	333.33	126.78	202.48	333.34	151.18
<i>Swartzia cubensis</i>	1.05	219.00	313.73	94.73	215.89	313.73	128.66

de ajuste y el comportamiento que tiene el CHL expresado en $l \cdot m^{-3}$ con respecto a la densidad básica. Se determinó que al aumentar la densidad básica de la madera el CHL manifiesta un decremento con un rango de variación de los valores estimados de 94 a $707 l \cdot m^{-3}$, por su parte, los valores ajustados manifiestan un comportamiento lineal y varían de 128 al $699 l \cdot m^{-3}$.

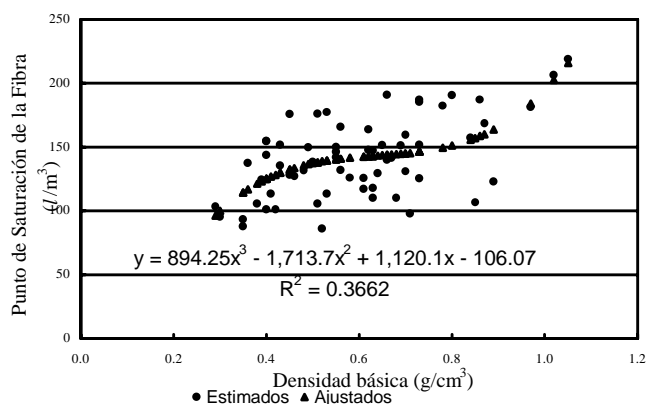
En los Cuadros 1 y 4 y Figura 3c, se muestra el modelo de ajuste y el comportamiento que tiene el MCH expresado en $l \cdot m^{-3}$ con respecto a la densidad básica. A medida que la densidad básica aumenta, el MCH disminuye con un rango de variación de los valores estimados de 313 a $810 l \cdot m^{-3}$, por su parte, los valores ajustados manifiestan un comportamiento lineal y presentan el mismo rango de variación que los valores estimados.

En la Figura 3d, se muestran las mismas correlaciones y el comportamiento de los parámetros de humedad analizados sólo que ahora transformados en litros por metro cúbico con respecto a la densidad básica para el grupo de las 63 maderas latifoliadas mexicanas estudiadas.

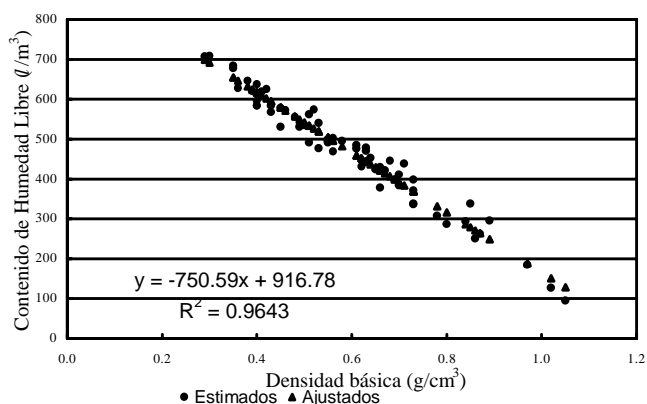
CONCLUSIONES

El PSF estimado de las 63 maderas estudiadas varía del 13 al 38 % en un rango de DB de 1.05 a $0.29 g \cdot cm^{-3}$, en tanto que el PSF ajustado tiene un comportamiento logarítmico y varía del 15 al 35 %. Para el mismo rango de DB, el CHL estimado varía del 9 a 243 % en tanto que el ajustado presenta un comportamiento exponencial y varía del 14 al 238 %. Por su parte el MCH estimado, varía del 29 al 279 %, mientras que el MCH ajustado exhibió un comportamiento exponencial y varía del 28 al 250 %.

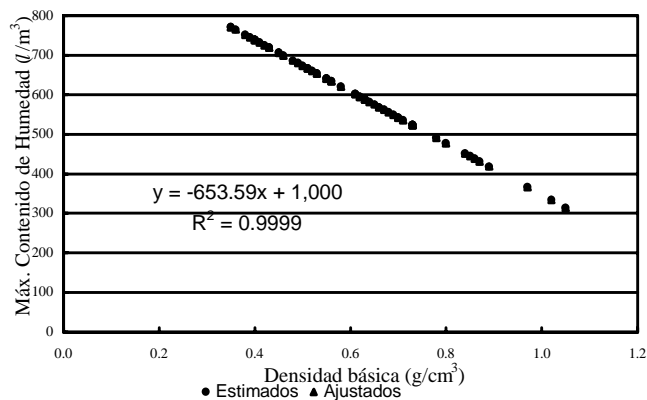
El PSF estimado en $l \cdot m^{-3}$ de las 63 maderas estudiadas varía de 219 a $86 l \cdot m^{-3}$ en un rango de DB de 1.05 a $0.29 g \cdot cm^{-3}$, en tanto que el PSF ajustado tiene un comportamiento polinomial de tercer grado y varía de 215 a $96 l \cdot m^{-3}$. Para el mismo rango de DB, el CHL estimado varía de 94 a $707 l \cdot m^{-3}$ en tanto que el ajustado presenta un comportamiento lineal y varía de 128 a $699 l \cdot m^{-3}$. Por su parte el MCH estimado, varía del 313 a $810 l \cdot m^{-3}$, mientras que el MCH ajustado exhibió un comportamiento lineal con el mismo intervalo de variación.



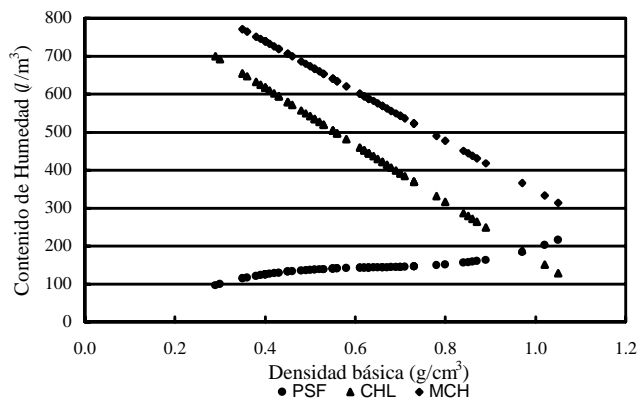
a. Densidad básica – Punto de saturación de la fibra



b. Densidad básica – Contenido de humedad libre



c. Densidad básica – Máximo contenido de humedad



d. Comportamiento de los parámetros de humedad

Figura 3. Correlación de la densidad básica con los parámetros de humedad en $l \cdot m^{-3}$.

Los modelos generados, representan una herramienta de mayor utilidad para el campo de la industria del secado y preservación de la madera, ya que se han estimado los comportamientos de las maderas mexicanas que se utilizan a nivel nacional. Además, permiten hacer cálculos para operaciones prácticas tanto de secado como de impregnación, dando así la posibilidad de que los operadores de estufas de secado o plantas de impregnación puedan estimar y conocer con mayor confiabilidad la cantidad de agua que se requiera eliminar si se trata de secado o de solución impregnante si se trata de procesos de preservación.

LITERATURA CITADA

- BÁRCENAS P., G. M. 1985. Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional. Nota Técnica No. 11. LACITEMA - INIREB. Xalapa, Ver. 18 p.
- ECKELMAN C. A. s/f. Wood moisture calculations. Forestry & Natural Resources. Furniture Manufacturing. FNR 156. 19 p. <http://www.agcom.purdue.edu/AgCom/Pubs/FNR/FNR-156.html>.
- ERDOIZA S., J. J.; CASTILLO M., M. I. s/f a. Susceptibilidad de impregnación con preservadores de cincuenta especies maderables mexicanas. Boletín técnico La Madera y su Uso No. 22. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz. 17 p.
- ERDOIZA S., J. J.; CASTILLO M., M. I. s/f b. Técnicas para la determinación de la retención y penetración de las sustancias preservadoras dentro de la madera. Boletín técnico la madera y su uso No. 20. Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz. 31 p.
- FUENTES S., M. s/f. Apuntes para el curso de tecnología de la madera I. Serie de apoyo académico No. 33. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 97 p.
- FUENTES S., M. 1998. Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. Revista Chapingo, Serie Forestal. IV(I): 221-229. Texcoco. México.
- FUENTES S., M. 2000. Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. Revista Chapingo, Serie Forestal. VI(I): 79-81. Texcoco. México.
- HAYGREEN, J. G.; BOWYER L., J. 1996. Forest products and wood science. An introduction. Iowa State University Press. 3a. Edición. Iowa. U. S. A. 484 p.
- JUNAC. 1989. Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas. Lima. Perú. s/p.
- KOLLMANN, F. P.; CÔTÉ W., A. W. 1968. Principles of wood science and technology. Vol. I Solid wood. New York. U. S. A. 592 p.
- PANSHIN, A. J.; DEZEEUW, C. 1980. Textbook of wood technology. New York. U. S. A. Editorial McGraw-Hill. 4a. Edición. 722 P.
- SIMPSON, W. T.; TENWOLDE, A. 1992. Physical properties and moisture relations of wood. *In*: Forest Products Laboratory. Wood Handbook: Wood as an engineering material. Agric. Handb. 72. Washington, DC. U.S. Department of Agriculture. 466 P.
- SIMPSON, W. T. 1993. Specific gravity, moisture content, and density relationships for wood. U. S. Department of Agriculture. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-76. Madison, WI: Forest Service, Forest Products Laboratory. 13 p.
- VIGNOTE P. S.; JIMÉNEZ P., F. J. 1996. Tecnología de la madera. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 602 p.