

GUIA PARA EL SECADO DE LA MADERA EN HORNOS

Documento Técnico 69/1998

Silverio Viscarra

Consultor

Contrato USAID: 511-0621-C-00-3027

Chemonics International

USAID/Bolivia

Agosto, 1998

Objetivo Estratégico de Medio Ambiente (USAID/Bolivia)

Guía para el Secado de la Madera en Hornos

***Proyecto de Manejo
Forestal Sostenible
BOLFOR***

Cuarto Anillo
esquina Av. 2 de Agosto
Casilla 6204
Teléfonos: 480766 - 480767
Fax: 480854
e-mail: bolfor@bibosi.scz.entelnet.bo
Santa Cruz, Bolivia

*BOLFOR es un proyecto financiado por USAID y el Gobierno de Bolivia e implementado por
Chemonics International, con la asistencia técnica de Conservation International,
Tropical Research and Development y Wildlife Conservation Society*

Las opiniones y juicios técnicos expresados en los informes del Proyecto BOLFOR, son emitidos por los consultores contratados por el proyecto y no reflejan necesariamente la opinión o políticas de la Secretaría Ejecutiva del PL480 o USAID.

TABLA DE CONTENIDO

		Página
SECCION I	INTRODUCCION	I-1
SECCION II	CONCEPTOS SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA MADERA Y EL AGUA EN EL MATERIAL	II-1
	A. Estructura de la Madera	II-1
	A1. Partes del Tronco	II-1
	A2. Cortes de la Madera	II-2
	A3. Tejidos Principales de la Madera	II-2
	B. Humedad de la Madera	II-3
	B1. El Agua en la Madera	II-3
	B2. Fórmula para Calcular el Contenido de Humedad (CH)	II-5
	B3. Métodos Principales para determinar el Contenido de Humedad	II-6
	B4. Contracción	II-6
	B5. Peso Específico Básico y Densidad	II-7
	C. Desarrollo del Proceso de Secado	II-8
	C1. Importancia del Contenido de Humedad de Equilibrio	II-9
	C2. Humedad de Equilibrio de la Madera en dos Ciudades de Bolivia	II-11
SECCION III	GUIA PRACTICA PARA EL SECADO EN HORNOS CONVENCIONALES	III-1
	A. Selección de la Madera	III-1
	B. Apilado y Cargado del Horno	III-2
	B1. Separadores	III-2
	B2. Sobresalido de Extremos	III-2
	B3. Clasificación por Largos	III-2
	B4. Soportes y Contrapesos de la Pila	III-3
	C. Muestras para el control de Secado	III-3
	C1. Selección	III-3
	C2. Número de Muestras	III-3
	C3. Preparación y Pesaje	III-3
	C4. Determinación de la Humedad y Cálculos de Peso Seco	III-4

	C5.	Localización en la Pila	III-8
	D.	Horarios o Programas de Secado	III-9
	D1.	Estructuración	III-10
	D2.	Lista de Horarios sugeridos para Maderas Bolivianas	III-13
	D3.	Aplicación del Programa de Secado	III-15
	D4.	Modificación de los Programas	III-15
	D5.	Programas para Madera Secada al Aire	III-16
	E.	Calentamiento e Inicio de la Operación del Horno	III-16
	F.	Tratamientos de Igualación y Acondicionamiento	III-17
	F1.	Igualación o Equilibrado	III-17
	F2.	Acondicionamiento	III-17
	G.	Pruebas Finales de Control de Humedad, su Distribución y las Tensiones de la Madera	III-18
	H.	Fin del Proceso y Descarga del Horno	III-19
	I.	Control del Horno	III-19
	J.	Tiempo de Secado	III-20
SECCION IV		DEFECTOS DE SECADO	IV-1
	A.	Agrietamiento y Rajaduras	IV-1
	A1.	Grietas Superficiales	IV-1
	A2.	Grietas Internas	IV-1
	A3.	Rajaduras	IV-1
	A4.	Prevención del Agrietamiento	IV-1
	A5.	Colapso	IV-2
	A6.	Remoción del Colapso	IV-3
	A7.	Torceduras	IV-4
	A8.	Prevención y Remoción de las Torceduras	IV-5
	B.	Defectos causados por Infección de Hongos e Insectos	IV-5
	C.	Manchas Químicas	IV-6
SECCION V		ALMACENAMIENTO DE LA MADERA	V-1
SECCION VI		REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	VI-1

Tablas:

1.	Niveles de Humedad de Acuerdo al Uso de la Madera	II-10
2.	Humedad de Equilibrio (CHE) para las Ciudades de Tarija y Santa Cruz	II-11
3.	Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas	III-11
4.	Programas Generales de Depresiones Psicrométricas para Maderas Latifoliadas	III-12
5.	Formación de un Programa de Secado en Horno para Madera de 1" de Espesor	III-14
6.	Peso Específico Básico, Densidad y Programas de Secado para Maderas Bolivianas	III-14

Figuras:

1.	Partes del tronco	II-1
2.	Cortes de la madera	II-2
3.	Tejidos principales de la madera. Representación esquemática de un trozo de madera	II-3
4.	El agua en la madera	II-3
5.	Diagrama de los termómetros de bulbo húmedo y bulbo seco montados para lecturas directas	II-9
6.	Distribución de contenido de humedad de equilibrio de la madera en las ciudades de Tarija y Santa Cruz	II-12
7.	Método de corte de una o dos o más muestras de secado en una tabla	III-4
8.	Ubicación de las muestras secadas a los lados de la carga	III-8
9.	Muestras de secado ubicadas en los extremos de la carga o pila	III-9
10.	Método de corte y tamaño de la probeta para determinar el CH, su distribución y las tensiones de la madera	III-19
11.	Pruebas de tensiones o esfuerzos de la madera	III-19
12.	Ejemplo de agrietamiento interno y colapso en cedro	IV-3
13.	Torceduras en la madera	IV-5

Anexo 1:

Formulario 1: Formulario para registro de muestras del horno

Formulario 2: Registro de temperaturas del horno

Formulario 3: Control final de la humedad y las tensiones

Formulario 4: Registro general del secado en planta

Anexo 2:

Humedad relativa ambiente y contenido de humedad de equilibrio de la madera para diferentes temperaturas del bulbo seco y depresiones del bulbo húmedo.

Anexo 3:

Programas de secado artificial sugeridos por el Laboratorio de Productos Forestales de Madison, EE.UU para algunas maderas tropicales

Anexo 4:

Horarios de secado practicados por el Pacto Andino en maderas regionales

Anexo 5:

Cálculo de la cantidad de agua a ser removida durante el secado.

Anexo 6:

Principales factores de transformación y conversión de unidades

Anexo 7:

Relación entre la densidad y el contenido de humedad en maderas bolivianas.

SECCION I

INTRODUCCION

Por secado de la madera se entiende, en forma general, el proceso de eliminación del agua en exceso del material recién cortado, que se aplica con el propósito de optimizar su posterior procesamiento y transporte para usos específicos.

La madera puede ser secada por uno de los tres métodos siguientes:

1. Secado completo al aire libre (secado natural).
2. Secado completo en hornos o cámaras.
3. Secado al aire hasta cerca del punto de saturación de las fibras y completando el proceso en un horno.

El método a emplear depende de numerosos factores tales como la especie de madera, el tamaño del material, la tasa relativa de secado, y la degradación o daño permisible.

Detalles sobre el secado natural o al aire no son considerados en esta guía que está referida solamente al proceso de secado en hornos. Mayores referencias sobre el secado al aire se pueden consultar en el "Manual del Grupo Andino para el secado de maderas", editado por la Junta del Acuerdo de Cartagena y actualmente a la venta en el Laboratorio de Productos Forestales de la Prefectura del Departamento de Santa Cruz.

La finalidad principal de este documento es proporcionar una guía que oriente en su trabajo al operador del horno de secado de madera, dando énfasis a las condiciones del medio boliviano.

Para una mejor comprensión del proceso de secado, la Guía proporciona un resumen general de la estructura básica de la madera, los tipos de cortes y de la asociación agua-madera; luego, se citan los pasos que se siguen para el secado de una carga de madera en un horno convencional y los defectos principales que se presentan en el proceso. Finalmente, se mencionan los cuidados que deben atenderse para el almacenamiento del material seco.

SECCION II

CONCEPTOS BASICOS SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA MADERA Y EL AGUA EN EL MATERIAL

A. Estructura de la Madera

La madera, como parte fundamental del tronco de los árboles tiene funciones de sostén de ramas y transporte de alimentos. Esto le confiere al material, características como porosidad (presencia de espacios vacíos) y elevada resistencia mecánica en relación con su peso, lo que origina que sus propiedades se manifiesten en diferente magnitud según las direcciones de corte.

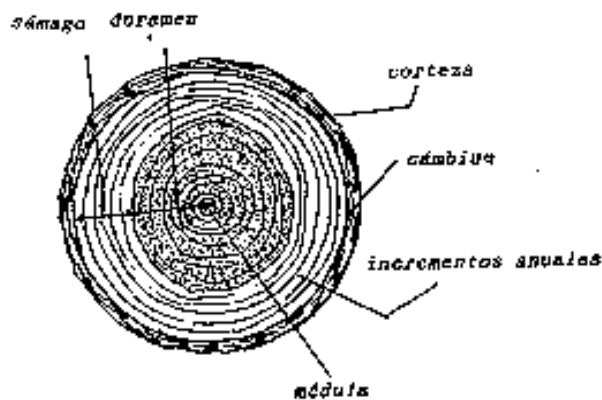


Figura 1: Partes del Tronco

A1. Partes del Tronco

Corteza es la cubierta protectora exterior y está conformada por tejidos muertos; sirve, además de proteger al árbol de agentes externos de daño, para evitar la evaporación del agua del tronco.

El cámbium es el tejido generatriz ubicado entre la corteza interna y el sámbago, produce la corteza hacia afuera y la madera hacia adentro. Si se daña al cámbium, la parte afectada muere.

El sámbago o jane, parte viva de la madera generalmente de color claro, está situada entre el cámbium y el duramen. Su contenido de humedad es mayor que el del duramen pero, seca más rápidamente que éste.

El duramen o madera de corazón, es la parte interna del tronco conformada por tejido muerto. Por lo general, esta madera es más oscura que la albura y su delimitación no siempre está bien definida.

La médula, es el núcleo central de un tronco. La madera cercana a la médula tiende a secar con más defectos que el resto del leño.

Anillos de crecimiento, son capas concéntricas de engrosamiento diametral, visibles en muchas especies, formadas por acción del cámbium.

A2. Cortes de la Madera

Los cortes en un tronco pueden ser de cuatro tipos (ver Fig. 2):

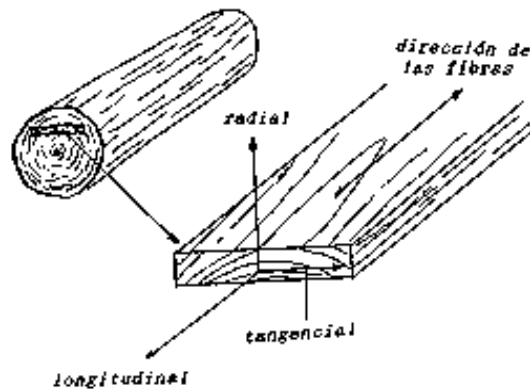


Fig. 2. Cortes en la madera

Corte transversal o sea de dirección perpendicular al eje del tronco, se produce, por ejemplo, al voltear un árbol o seccionar un tronco.

Corte tangencial cuando se realiza tangencialmente a los anillos de crecimiento del árbol. Es el corte en el que mejor se aprecia el veteado o figura de la madera.

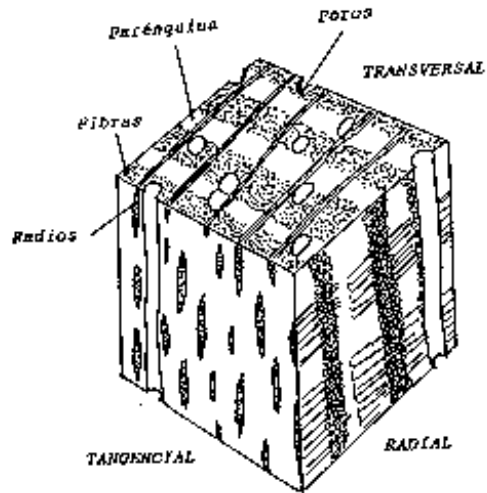
Corte radial cuando tiene dirección paralela a los radios. Es el corte más estable de la madera ante cambios de humedad del material.

Corte oblicuo cuando se realiza de manera intermedia entre el corte tangencial y el corte radial.

A3. Tejidos Principales de la Madera

Realizando un corte en la madera y observándolo con lupa o microscopio, se puede apreciar los siguientes tejidos básicos:

Fig. 3. Tejidos principales de la madera.
Representación esquemática de un trozo de bibosi
(*Ficus glabrata*)



Poros, se denomina así al corte transversal de los vasos. Son de diferente tamaño y pueden estar o no agrupados.

Parénquima, es un tejido de reserva que puede ser de dos tipos: longitudinal, un tejido blando y claro, y los radios que se dirigen al centro del tronco. Constituyen zonas de fallas donde se originan las grietas y rajaduras de la madera, durante el secado.

Fibras, tejido que cumple la función de sostén del árbol; sus extremos son ahusados y el interior es hueco. Las paredes son de grosor variable, según la densidad de la madera.

B. Humedad de la Madera

B1. El Agua en la Madera

El árbol en pie contiene un elevado nivel de agua. Algunas especies livianas como la balsa y el mapajo pueden contener hasta 300% ó 400% de contenido de humedad; otras muy pesadas como el quebracho colorado llegan hasta un 50% a 60% como máximo.

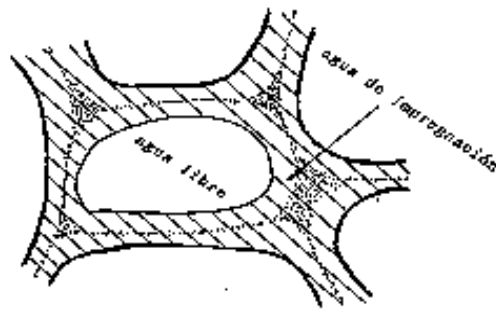


Figura 4: El agua en la madera

El agua en la madera está presente en dos formas: **agua libre o capilar**, que se encuentra en el interior de las cavidades celulares. Es el agua de más fácil extracción. Al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las propiedades físicas y mecánicas del leño y se llega a un nivel de humedad de aproximadamente 30% en la madera. A este contenido de humedad se denomina **Punto de Saturación de la Fibras (PSF)**.

El **agua de impregnación** es la que se encuentra adherida a las paredes celulares. Una vez iniciada la eliminación de esta forma de humedad a partir del PSF, se inician las modificaciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

El contenido de humedad medido en algunas maderas nacionales cortadas en estado húmedo o verde, es el siguiente:

Cedro:	120%	Serebó:	130%
Quebracho blanco:	65%	Roble:	110%
Tajibo:	55%	Ajunao:	70%
Kaqui:	170%	Soto:	50%
Plumero:	155%	Mapajo:	140%

Las especies porosas y de menor peso relativo contienen mayor volumen de **agua libre**, respecto a las especies pesadas.

En función a su contenido de humedad, la madera recibe varias denominaciones, como ser:

Denominación del estado de la madera	Nivel de humedad	Lugar de ubicación
Madera verde	de 80 a + 200%	bajo cubierta en el bosque
Madera húmeda	25 a 80 %	recién cortada, en patio de trozas o a la intemperie
Madera poco seca	de 20 a 25%	aire libre
Madera seca al aire	de 15 a 20%	bajo techo
Madera muy seca	de 8 a 15%	interiores
Madera anhidra	0%	en laboratorio

B2. Fórmula para Calcular el Contenido de Humedad (CH)

El nivel de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco:

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100$$

donde:

Ph = Peso de la madera húmeda o peso inicial
Po = Peso de la madera anhidra
CH = Contenido de humedad de la madera, %

Para calcular el contenido de humedad, se emplea una probeta pequeña de madera. El peso seco o anhidro se determina después de exponer la probeta a una temperatura de aproximadamente 103 °C, hasta que su peso no varíe.

Esta expresión es relativa y no proporciona una medida de la cantidad absoluta de humedad, a no ser que se tome en cuenta la densidad o peso específico básico del material (Ver Anexo 5). Una pieza de quebracho colorado con 20 % de contenido de humedad tiene más agua que una pieza de ochoó de las mismas dimensiones, porque la pieza de quebracho colorado, por ser más pesada, contiene mayor cantidad de paredes celulares, y por tanto más humedad.

Ejemplo. Determinar el contenido de humedad de la madera, con los siguientes datos:

Peso húmedo (Ph): 46,6 g
Peso seco en estufa (Po): 28,0 g

$$CH = \frac{46,6 - 28,0}{28,0} \times 100 = 66,4\%$$

Ejercicios.

C Calcular el contenido de humedad de las siguientes muestras, empleando las dos fórmulas del CH.

1. Ph = 195,04 g; Po = 147,41 g
2. Ph = 199,04 g; Po = 135,86 g
3. Ph = 79,56 g; Po = 72,30 g
4. Ph = 51,26 g; Po = 33,13 g

C Si se cuenta con una balanza que pesa con precisión de hasta 0,1 g, considerar los pesos del anterior ejemplo, tomando en cuenta esa nueva aproximación volver a calcular el CH de cada muestra. Sacar conclusiones.

B3. Métodos Principales para determinar el Contenido de Humedad

Existen varios métodos para determinar el contenido de humedad de la madera, los más comunes son el método gravimétrico o por pesadas y el método eléctrico.

En el primer método, se emplea una balanza con una precisión aproximada de 0,1 g para pesar la muestra (peso húmedo) al momento de su obtención y después se determina el peso anhidro, como se describió en el inciso anterior. Este método es uno de los más exactos y confiables.

El segundo método emplea algunas propiedades eléctricas de la madera. El aparato más empleado es un medidor del contenido de humedad basado en la resistencia eléctrica que ofrece la madera al paso de una corriente continua (de una batería o pila). La precisión de estos aparatos es alrededor de 1% y sólo son de lectura confiable entre 6% y 25% de contenido de humedad; fuera de este rango son de dudosa precisión y exactitud.

Las lecturas dependen de la especie de madera, temperatura de la tabla y de la profundidad de penetración de los electrodos. Algunos modelos disponen de una corrección por especie para las maderas más conocidas, y otros, además, tienen corrección por temperatura.

Ejercicios:

Medir con un detector de humedad eléctrico en base a resistencia, una tabla húmeda y otra más seca. Tomar al menos 3 mediciones en diferentes lugares de la tabla. Hacer una lectura a 2 mm de profundidad de penetración de los electrodos y la otra a la profundidad recomendada por el catálogo del fabricante, en cada tabla. Anotar las mediciones y sacar conclusiones. Comparar las medidas determinando la humedad de las tablas por el método de las pesadas.

B4. Contracción

Por contracción se entiende a la disminución en las dimensiones radial, tangencial y longitudinal o del volumen de la pieza, desde el estado húmedo hasta un nivel de humedad por debajo del PSF, expresada como un porcentaje, respecto a la dimensión inicial o del material húmedo.

$$C = \frac{\text{Dimh} - \text{Dims}}{\text{Dimh}} \times 100$$

Dimh = Dimensión (Rad. Tang. o Volum.), húmeda o inicial
Dims = Dimensión (rad., Tang. o Volum.) de la madera seca
C = Contracción (radial, tangencial o volumétrica), %

La contracción tangencial de la madera es alrededor del doble del valor en dirección radial y varía entre 6 a 12%, para las maderas bolivianas estudiadas hasta ahora. La contracción longitudinal es prácticamente despreciable.

Ejemplo. Una tabla de ajo ajo cortada tangencialmente (madera húmeda) tiene un ancho de 15 cm (6"), al secar en horno hasta el 10% de contenido de humedad la pieza se contrae hasta una nueva dimensión de 14 cm. ¿Cuánto es la contracción de la tabla?

$$CH = \frac{(15 - 14)}{15} \times 100 = 6,7\%$$

Ejercicios:

Tomar en cuenta las contracciones de las maderas bolivianas, que se mencionan en la tabla siguiente:

ESPECIE DE MADERA:	Contracción Normal*		Contracción Total*	
	Radial	Tangencial	Radial	Tangencial
Serebó	1,9%	3,8%	3,5%	6,8%
Mapajo	2,9%	5,0%	5,2%	8,8%
Bibosi	1,8%	3,7%	3,6%	7,4%
Ochoó	2,0%	2,9%	3,9%	5,7%
Yesquero	2,3%	3,8%	4,4%	7,2%
Palo maría	2,7%	4,4%	5,1%	8,3%
Almendrillo	2,3%	3,6%	5,5%	8,2%
Tajibo	1,3%	2,3%	3,3%	5,6%

FUENTE: "Propiedades físicas de veinte especies forestales bolivianas". Viscarra-Vásquez-Pérez, JUNAC. 1977.

- C Elija una especie en particular de la tabla. Si se tiene una pieza de madera húmeda de 10" (25,4 cm) de ancho y 2" (5,08 cm) de espesor, ¿cuál es su merma o disminución en ancho y espesor, suponiendo que la cara es corte radial y la madera debe secar hasta el 12% de contenido de humedad?
- C Haga los mismos cálculos si la cara tiene corte tangencial y diga ¿cuánto es la merma en ancho y espesor de la pieza?

B5. Peso Específico Básico y Densidad

Peso específico básico (Peb) es el cociente entre el peso seco en estufa (anhidro) de la madera y peso del volumen de agua desplazada por la madera verde.

* Por **contracción total** se entiende la disminución por-cenual en dimensiones que ocurre cuando la madera ha perdido toda el agua (hasta 0% de contenido de humedad, CH). **Contracción normal** es la disminución porcentual en dimensiones, cuando la madera ha secado al aire (12% de CH, aproximadamente).

$$\text{Peb} = \frac{\text{Peso seco en estufa}}{\text{Volumen verde o húmedo}}$$

Este valor no depende de la humedad de la muestra.

La densidad (Dad) se expresa como la relación entre la masa y el volumen de la madera a un determinado nivel de humedad. En la práctica, las mediciones son del peso y no de la masa, por ello, se llama también peso específico aparente.

$$\text{Dad} = \frac{\text{Peso de la muestra de madera}}{\text{Volumen de la muestra}}$$

El peso específico y la densidad son de mucho interés para el operador de un secadero de madera, ya que ayudan a ajustar los programas de secado. Las maderas más densas son generalmente las de más difícil secado.

En la Tabla N° 6 se proporcionan los valores de peso específico básico y densidad al 12 % de contenido de humedad de las maderas bolivianas.

C. Desarrollo del Proceso de Secado

La pérdida de agua se produce por un proceso de naturaleza diferente dependiendo de si el contenido de humedad está por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF).

Por encima de este nivel, la velocidad de secado bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire permanece constante.

Cuando el secado ha avanzado a contenidos de humedad por debajo del PSF, el agua retenida en la madera se mueve más lentamente, retardando el proceso.

Finalmente, la progresión del secado tiende hacia una curva cuyo valor límite es el **Contenido de Humedad de Equilibrio (CHE)** de la madera, que depende de las condiciones climáticas del medio en el cual se encuentra estacionado el material. Las más importantes de estas condiciones son la temperatura del aire y la humedad relativa ambiente**.

La humedad relativa se mide a través de psicrómetros, compuestos por dos termómetros, uno de ellos de bulbo descubierta que mide directamente la temperatura del aire (temperatura del bulbo seco, TBS) y el otro, lleva en el bulbo una gasa empapada en agua que origina un

** *Relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda encontrarse en ese volumen de aire, a una misma temperatura.*

enfriamiento por evaporación, que da lugar a una lectura menor del termómetro (temperatura del bulbo húmedo, TBH). La diferencia entre las dos lecturas se denomina depresión psicrométrica, que junto con la lectura del termómetro seco determina la humedad relativa con la ayuda de una tabla, como la del Anexo 2.

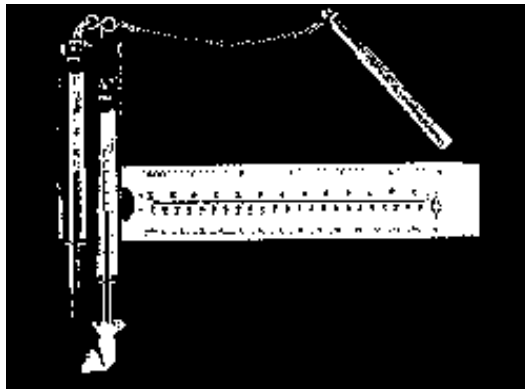


Figura 5. Diagrama de los termómetros de bulbo húmedo y bulbo seco montados para lecturas directas

C1. Importancia del Contenido de Humedad de Equilibrio

El conocimiento de la humedad de equilibrio (CHE) de la madera es fundamental para la conducción del secado artificial, porque es el parámetro que ayuda a guiar la manipulación de la temperatura y la depresión psicrométrica en el interior del horno, hasta alcanzar el nivel de humedad al que la madera será procesada o utilizada. Un patrón de variaciones del CHE en función del cambio de la temperatura y depresión psicrométrica, se presenta en el Anexo 2.

Los valores recomendados de contenido de humedad para varios usos de la madera en los EE.UU. de Norteamérica han sido extraídos de Kollmann y Côté (1968) y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles de Humedad de Acuerdo al Uso de la Madera

Uso de la Madera	Contenido de Humedad	
	Promedio	
Madera, durmientes, postes, etc. para tratamiento con preservantes	25	agua libre extraida
Canastas y empaques de frutas	20	8-45
Madera para embarcaciones	12	12-15
Tanques y silos	12	12-15
Cajas	12	6-18
Revestimientos de autos	12	8-16
Piezas delgadas para Revestimientos Ext.	10	10-12
Ataúdes	9	7-12
Tablas para vigas y viguetas	8	6-20
Sillas y partes	6	5-12
Pisos	6	6-10
Muebles	6	4-10
Mangos	7	2-10
Mangos de brochas	5	2-10
Marcos, puertas, celosías, etc.	6	4-8
Instrumentos musicales, radios cajas de piano	5	3-6
Hormas para zapatos	5	4-6
Lanzaderas, bobinas	5	4-6
Chapas y láminas:		
- Caras	4	2-7
- Interior o relleno	5	2-6
- Venesta o triplay	6	2-9

Para Bolivia, la mayoría de los valores promedio requeridos para muebles están dentro de los rangos de humedad señalados en la anterior tabla. Algunos valores, como es el caso de puertas y marcos para uso nacional, son algo más elevados, en una magnitud aproximada de 2 a 3% de contenido de humedad.

C2. Humedad de Equilibrio de la Madera en dos Ciudades de Bolivia

Los valores promedio de la humedad de equilibrio de la madera han sido estimados en base a datos de medias mensuales de la temperatura y humedad relativa *** de las ciudades de Santa Cruz (situada a una altitud de 437 m.s.n.m.) y Tarija (a una altitud de 1870 m.s.n.m.), registrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los resultados se muestran en la Tabla 1 y Figura 6.

En el futuro se espera recopilar la información para el resto del país.

Tabla 2: Humedad de Equilibrio (CHE) para las Ciudades de Tarija y Santa Cruz

Mes	CHE Tarija, %	CHE Santa Cruz, %
Enero	11,8	14,5
Febrero	12,7	14,2
Marzo	12,2	14,1
Abril	11,4	14
Mayo	10,6	14,8
Junio	9,8	14,9
Julio	9,7	13,4
Agosto	9,1	11
Septiembre	8,8	10,7
Octubre	9,7	11,4
Noviembre	10,4	12
Diciembre	11,1	13,2
<i>Promedio anual</i>	<i>10,6</i>	<i>13,2</i>

*** Según el SENAMHI, los valores están ajustados a la altura del lugar de registro, de acuerdo a la presión barométrica respectiva.

En la estimación se empleó el modelo de Hailwood y Horrobin con $n=2$ hidratos.

De acuerdo a la figura, se prevé durante el año un rango de variación de 4 °C en el valor del contenido de humedad de equilibrio de la madera en las dos ciudades, originado por los cambios de temperatura y humedad relativa ambiente.

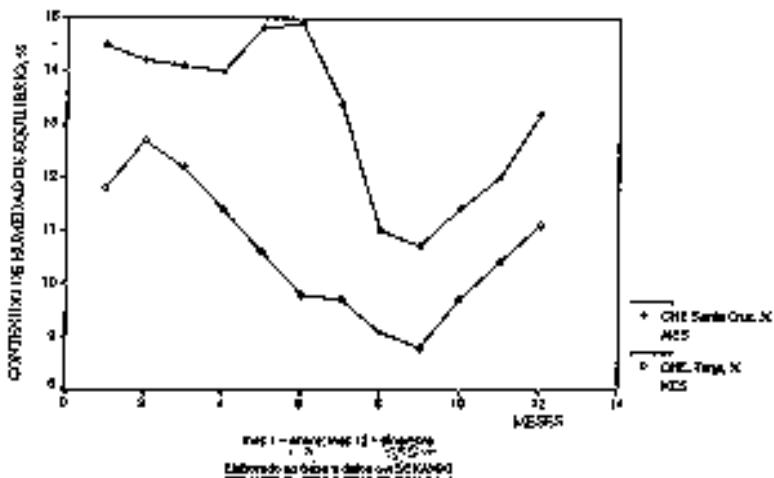


Figura 6: Distribución de contenido de humedad de equilibrio de la madera en las ciudades de Tarija y Santa Cruz

En pruebas de secado al aire realizadas en la ciudad de Santa Cruz en el año 1977 por el Ing. A. Arce, se obtuvieron los siguientes resultados de humedad de equilibrio ambiental, que corresponden a algunas maderas bolivianas (20 muestras de 1" de espesor por cada especie):

Especie	CHE %	Especie	CHE %
Ajo ajo	15,5	Negrillo	15,9
Almendrillo	14,8	Ochoó	15,5
Bibosi	16,5	Pacay	16,9
Blanquillo	15,4	Palo maría	16,3
Coquino	16,0	Plumero	17,0
Curupaú	16,5	Sangre de vaca	16,3
Guayabochi	16,6	Serebó	16,8
Kaqui	16,7	Tachore	15,5
Mapajo	16,4	Verdolago	15,8
Mururé	13,2	Yesquero	16,9

Estos valores varían con el cambio de las condiciones ambientales a través del año y resultan, en general, algo más elevados que los promedios mostrados en la Tabla 1, probablemente, a causa de la diferenciación entre especies y porque en el período de ensayo, se registraron temperaturas similares al promedio empleado para la confección de la Tabla 1, pero, la humedad relativa ambiente fue superior.

SECCION III

GUIA PRACTICA PARA EL SECADO EN HORNOS CONVENCIONALES

En la operación normal de un horno secador, es necesario tomar ciertas precauciones para conseguir resultados satisfactorios. La madera debe ser apropiadamente apilada, se deben incluir en la pila suficientes muestras de secado, para verificar el contenido de humedad de la carga a un determinado tiempo, y las condiciones de secado requieren ser cuidadosamente controladas a través del proceso.

Los hornos convencionales son cámaras o compartimientos cerrados, dotados de ventiladores que dan lugar a una circulación forzada del aire dentro de la cámara; tienen, también, un sistema de calentamiento controlado que permite elevar la temperatura del horno y dispositivos regulables para conseguir la variación deseada de la humedad relativa en el ambiente interior del horno.

Un horno, para secar madera, debe tener un buen aislamiento térmico, ser de construcción hermética, fabricarse de materiales resistentes a la corrosión y elevadas temperaturas, y disponer de puertas de fácil manejo y cierre hermético.

El secado convencional se verifica a temperaturas entre 40 y 100 °C y se diferencia del secado a alta temperatura porque éste opera por encima de 100 °C.

Los pasos a seguir para una operación normal de secado en hornos se inician con la selección de la madera y prosiguen con el apilado o armado de la carga para el horno, la toma de muestras para control de la humedad durante el secado, la selección del horario o programa para la especie en cuestión, el control del contenido de humedad, la aplicación de tratamientos de igualado y acondicionamiento, y pruebas finales de control del contenido de humedad, distribución y tensiones de la madera.

A. Selección de la Madera

La homogeneización de la carga de madera facilita el secado en hornos. Tal uniformidad del material se logra seleccionándolo por:

- C Especie
- C Espesor
- C Nivel de humedad
- C Tipo de madera (sámago y duramen)
- C Cortes radiales y tangenciales

Aunque en nuestro medio no se aplican todos los procedimientos de selección citados, es aconsejable su implementación para el mejor desempeño del trabajo, ya que los programas de secado se conducen según las condiciones del material más difícil de secar o el que limite la aceleración del proceso.

B. Apilado y Cargado del Horno

La construcción de la pila del horno es de importancia primordial. Aún si todos los demás factores son perfectos, su falla representará, con seguridad, la degradación del material en forma de combaduras, revirado o torceduras, rajaduras en extremos y desigual contenido de humedad en las piezas. La pila debe estar bien alineada vertical y horizontalmente. El tamaño de la carga dependerá de la capacidad y tipo de horno a ser empleado. Hay muchas precauciones que deben ser rígidamente observadas para asegurar la máxima tasa de secado con el mínimo daño del material que se indican a continuación.

B1. Separadores

Los separadores deben ser de un espesor uniforme, entre 12 mm ($\frac{1}{2}$ " y 25 mm (1"), los más delgados se usan cuando se quiere disminuir la tasa de secado de la madera. Se prefieren anchos entre 25 mm (1") y 37 mm ($1\frac{1}{2}$ "). Los separadores deben estar exactamente alineados en dirección vertical y espaciados hasta 60 cm (2'), uno del otro en la misma fila.

Estas precauciones son necesarias para evitar el comado y revirado de las piezas (que ocurren si los separadores no están correctamente colocados a lo largo de la carga), o los bloqueos al paso del aire entre las filas de la carga cuando los separadores tienen espesor irregular.

La primera y la última fila de separadores deben estar lo más cerca posible de los extremos de las tablas para evitar el voladizo, que ocasiona el agrietamiento y rajado de los extremos.

B2. Sobresalido de Extremos

Los extremos de las piezas deben quedar alineados porque los que sobresalgan, al no estar soportados, se curvarán bajo su propio peso y se deformarán. Esto afecta a la tabla en particular y al resto de la pila, pudiendo causar distorsión en toda la carga. Por otro lado, con el sobresalido de los extremos, el secado de esas piezas es más rápido con respecto al resto de la pila y puede presentarse un severo agrietamiento de los extremos.

B3. Clasificación por Largos

El problema antes mencionado se puede evitar clasificando los largos de la madera a secar antes de armar la pila. Las tablas largas pueden ser usadas para las hileras exteriores de la carga y dos cortas, que juntas sumen el largo de la carga, una tras otra para llenar el resto de las filas. Si una combinación de dos tablas no ajusta la longitud de la carga, se traslapan entre ellas de modo que los

extremos de la carga sean cuadrados. Si el largo de esas piezas es tal que sus extremos no caben dentro del espaciado normal de los listones, puede ser útil colocar un pequeño listón del ancho de la pieza para apoyarla.

B4. Soportes y Contrapesos de la Pila

Cuando la madera es muy susceptible al alabeo, como es el caso del palo maría y otras especies nacionales, se pueden colocar contrapesos encima de la capa superior de la pila, consistentes en prensas de resortes, piezas de durmientes en desuso o moldes de hormigón que apliquen una presión entre 250 y 1000 kg/m², dependiendo de la especie de madera, el espesor del material y el grado de reducción de la deformación deseada. Estos contrapesos ayudan a estabilizar la carga, especialmente de las hileras superiores de madera, que es donde se presentan las torceduras.

C. Muestras para el control del Secado

C1. Selección

Por lo general, las muestras se eligen durante la fase del apilado de la madera. La mayoría de los tablones, de los cuales se toman las muestras, deberán representar la madera más húmeda y lenta de secar; algunas muestras deben corresponder a los tablones de madera más seca o de mayor velocidad de pérdida de humedad.

C2. Número de Muestras

El número de muestras de secado a tomar es como mínimo cuatro por cada 20 m³ (8.500 pies-tabla), y de 10 a 12 muestras por cada carga de 100 m³ (42.000 pies-tabla) o más, del horno secador.

C3. Preparación y Pesaje

El método para determinar el contenido de humedad por pesadas de toda la carga es difícil de usar cada vez que se necesita. Por ello, se incluyen muestras de secado en cada pila del horno de modo que el contenido de humedad pueda ser rápidamente encontrado, como se verá más adelante.

C El primer paso en la preparación de las muestras de secado es cortar y marcar las tablas de las cuales éstas proceden y numerar claramente cada probeta como se muestra en la figura 7. Las muestras de secado se cortarán de tablas representativas de la pila y deben ser al menos de 76 cm de largo.

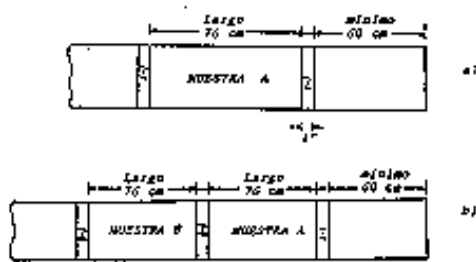


Figura 7: Método de corte de una y dos o más muestras de secado en una tabla

En la mayoría de los casos, de cada tabla elegida se obtiene una muestra pero se pueden tomar más; para ello se recomienda seguir el esquema de la Figura 7. El contenido de humedad de la muestra es, entonces, el promedio de las probetas A-1 y A-B para la muestra A y el promedio de las probetas A-B y B-1 para la muestra B.

Para evitar el efecto de algún secado de los extremos que hubiese ocurrido en la tabla antes del corte, las muestras de secado deben ser tomadas, al menos, a 60 cm de los extremos.

- C Inmediatamente después del corte de las muestras se cubren los extremos con un impermeabilizante y se pesan; el peso se debe anotar en la muestra que corresponda. Se emplea para este fin balanzas de hasta 20 kg de capacidad con la mayor precisión posible. La cobertura de los extremos de las muestras tiene por finalidad retardar el secado de los extremos y hacer que la tasa de pérdida de humedad de la muestra sea comparable a la de tablas largas. Se pueden utilizar para este propósito lacas, parafinas o pinturas al aceite. También pueden servir mezclas de pintura al agua y carpícola.
- C Las probetas para determinación del contenido de humedad deben ser pesadas rápidamente, previa eliminación de las rebarbas y astillas producto del corte, antes del pesaje. No hay necesidad de sellar los extremos. Cuando se cortan dos probetas para determinación de la humedad correspondiente a los lados de la muestra de secado, se pueden pesar juntas o por separado y se debe marcar el peso en las probetas. Se emplea una balanza de hasta 1 kg de capacidad y de 0,1 g o más precisa.

C4. Determinación de la Humedad y Cálculos de Peso Seco

El contenido de humedad se expresa siempre como el porcentaje del peso seco de la muestra y por ello, es necesario calcular dicho peso en la muestra de secado.

Las probetas obtenidas para calcular el contenido de humedad de las muestras de secado, según lo descrito en el inciso anterior sobre preparación y pesaje, son secadas en una estufa de laboratorio a una temperatura de 103 °C a 105 °C, hasta alcanzar un peso constante. Esto

normalmente toma de 12 a 24 horas. El contenido de humedad se determina como el porcentaje del peso anhidro, según la ecuación mencionada en el capítulo 2 (página 6).

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100 \quad \text{o bien,}$$

$$CH = \left(\frac{Ph}{Po} - 1 \right) \times 100$$

Siguiendo el ejemplo de la figura 7 para el caso de **una muestra de secado**, se tiene:

Probeta A-1: peso inicial = 225,5 g peso anhidro = 140 g CH ₁ = 61,1 %	Probeta A-2: peso inicial = 206,8 g peso anhidro = 129,6 g CH ₂ = 59,6 %
------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

Entonces, el contenido de humedad calculado de la muestra A:

$$CH_A = \frac{61,1 + 59,6}{2} = 60 \%$$

Verificar que el mismo valor se obtiene considerando en la fórmula del contenido de humedad, la suma de los pesos iniciales o húmedos y la suma de los pesos anhidros.

Refiriéndonos ahora al caso de las **dos muestras de secado** de la figura 7:

Contenido de humedad calculado de la muestra A,

$$= \frac{CH\% \text{ sección A-1} + CH\% \text{ sección A-B}}{2}$$

Contenido de humedad calculado de la muestra B,

$$= \frac{CH\% \text{ sección A-B} + CH\% \text{ sección B-1}}{2}$$

Con el contenido de humedad de las muestras de secado y conociendo el correspondiente peso original.

Peso seco al horno de la muestra de secado:

$$\text{Peso original de la muestra} \times 100 = \frac{\text{Peso seco al horno}}{(\text{CH original} + 100)}$$

Ejemplo: Para el caso de la muestra A de la figura 7.

Peso original de la muestra de secado = 2,90 kg

Contenido de humedad original = 60 %

$$\begin{aligned} \text{Peso seco al horno} &= \frac{2,90 \times 100}{(100 + 60)} \\ &= \frac{290}{160} \\ &= 1,81 \text{ kg} \end{aligned}$$

Si se conoce el peso seco al horno de la muestra de secado, es posible calcular el contenido de humedad en un tiempo determinado solamente por pesaje de la muestra y la ecuación del contenido de humedad.

$$\text{CH\%} = \frac{(\text{peso de la muestra en un tiempo determinado} \times 100)}{\text{peso seco al horno}} - 100$$

Ejemplo:

Suponiendo que en la cámara de secado el peso de la muestra ha bajado a 2,75 kg después de 48 horas, el contenido de humedad sería:

$$\begin{aligned} \text{CH \%} &= \frac{(2,75 \times 100)}{1,81} - 100 \\ &= 51,9 \% \text{ se puede redondear a } 52\% \end{aligned}$$

Si se requiere calcular el peso de una tabla a un contenido de humedad determinado, se utiliza la ecuación:

$$\text{Peso a un CH determinado: } \frac{(100 + \text{CH dado}) \times \text{peso seco al horno}}{\text{peso seco al horno}}$$

Ejemplo:

Se quiere conocer cuánto debe pesar la muestra a 30% de contenido de humedad sabiendo que el peso seco al horno de la muestra es 1,81 kg. Se procede así:

$$\begin{aligned} \text{CH}_{30} &= \frac{(100 + 30) \times 1,81}{100} \\ &= 2,35 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ejercicio:

Ejecutar las mismas operaciones para el caso de dos muestras de madera suponiendo que la muestra A tiene los mismos datos anteriormente descritos y la muestra B, además del mencionado peso común A-B que sería igual en este caso a A-2, el peso de la probeta B1 es:

Peso inicial = 385,4 g
peso final = 237,6 g

CH = 62,2 %

$$\text{CH}_B = \frac{59,6 + 62,2}{2} = 60,9 \text{ % que podemos redondear a 61%}$$

El peso de la muestra antes del secado es de 3,05 kg y a las 48 horas baja a 2,86 kg.

Peso anhidro = 1,89 kg
CH a 48 hrs = 51 %
Peso a CH₃₀ = 2,46 kg

Ejercicios:

Determinar el peso seco (anhidro) de tres muestras de secado, cuyos niveles de humedad previamente determinados son: 36,4%, 32,5% y 46,5%. El peso de las muestras al ingresar al horno (peso verde) es 7,96 kg, 6,95 kg y 10,45 kg, respectivamente.

C Si al tercer día de secado las muestras registran los siguientes pesos: 7,72 kg, 6,65 kg y 9,97 kg, respectivamente, encuentre el contenido de humedad actual de cada muestra.

C ¿Cuánto debe pesar cada muestra al final, si el secado se conduce hasta obtener material con el 9% de contenido de humedad?

C5. Localización en la Pila

El número de muestras de secado y su localización dentro del horno varían con el tamaño, tipo y eficiencia de la cámara. Es importante que las muestras no impidan el flujo de aire y que éstas se ubiquen de modo que el aire circule en igual forma que en el resto de la pila.

En un horno eficiente debería haber poca o ninguna variación en la tasa de secado en dos lugares cualesquiera en el horno; pero, es recomendable que al menos una muestra de secado esté instalada en ambos lados de la carga y una en cada extremo, tan cerca del centro de la carga como sea posible.

En vez de ubicar todas las muestras de secado en los extremos, es conveniente localizar en una o dos hileras al menos dos muestras, en frente y los lados, llenar el espacio entre el lado de la pila y las muestras de secado con piezas de relleno cortadas al mismo largo, de un material de rechazo que esté disponible (ver Figuras 8 y 9). De este modo, se puede revisar la tasa de secado cerca del centro de la pila. Las cargas secadas en hornos que tienen una puerta de inspección en el extremo, llevan una o varias muestras colocadas en el extremo y los lados. En Bolivia, la mayoría de los hornos tienen ventanillas insertas en los portones de ingreso y salida de la carga. Allí se colocan las muestras de secado en número de 3 ó 4 por ventanilla. Algunas cámaras disponen de puertas para el ingreso a los hornos durante su operación. Casi nunca se colocan muestras a los costados de las cargas. Varios hornos (por ejemplo, los computarizados) disponen de sistemas de control de humedad que conectan electrodos fijados en las tablas, con una unidad de lectura ubicada fuera del horno.

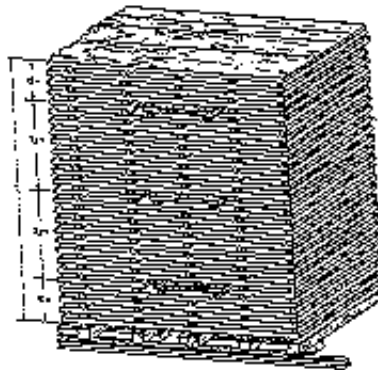


Figura 8: Ubicación de las muestras secado a los lados de la carga
FUENTE: Rasmussen (1960)



Figura 9: Muestras de secado ubicadas en los extremos de la carga o pila

D. Horarios o Programas de Secado

Después de tener las muestras de secado ubicadas en la pila y determinados sus contenidos de humedad, se procede a seleccionar un programa de secado para el material.

Los programas u horarios de secado consisten en una tabla de temperaturas y depresiones psicrométricas que sirven de guía al operador para secar una madera dada, con rapidez razonable y con el menor deterioro posible.

En vista de los múltiples factores que intervienen en el secado de la madera y la variedad existente de diseños de hornos en funcionamiento, ningún programa u horario se considera como ideal. En el Anexo 3 de esta guía se presentan programas que resultaron de muchos años de investigación por parte del Laboratorio de Productos Forestales, perteneciente al Servicio Forestal de Estados Unidos de Norteamérica, en Madison.

Se extrajeron los programas aplicables para las maderas tropicales bolivianas pero, pueden ser elaborados otros, según los lineamientos que se describen más adelante. Los programas constituyen guías conservadoras para el secado; el operador de un horno puede emplearlas hasta adquirir la práctica que le permita estructurar sus propios programas.

Los programas mencionados se aplican a hornos de tipo compartimiento, con circulación forzada de aire a velocidades entre 1 y 2 metros por segundo y temperaturas entre 38 y 90 °C. Están elaborados en base al control del contenido de humedad de muestras representativas, colocadas en cada carga de madera y en donde se observa el desarrollo de los esfuerzos en magnitud y tipo.

Existen también programas en base a tiempo que se establecen después de muchos experimentos realizados con la misma especie.

D1. Estructuración

Los horarios se plantean para secar madera verde pero, pueden aplicarse a maderas previamente secadas al aire, con algunas indicaciones que se mencionan más adelante.

De acuerdo con experiencias realizadas en Norteamérica, las condiciones de temperatura y depresión psicrométrica se han tabulado por separado a fin de hacer más flexible cualquier combinación entre ellas; las de la depresión han sido divididas en clases progresivas de A a la F, de acuerdo con el contenido de humedad verde de cada especie.

El control de defectos durante el secado requiere de condiciones benignas al principio. La humedad relativa debe ser lo suficientemente elevada (pequeña depresión psicrométrica) para evitar grietas en las caras y extremidades. En este caso, la temperatura debe ser lo suficientemente baja para evitar el colapso y el apanamiento. La madera pierde rápidamente humedad al principio, y para mantener esa rapidez se debe agrandar la depresión tanto como su contenido de humedad lo permita.

Clases de Madera según su Contenido de Humedad Verde

A	B	C	D	E	F
Hasta 40%	de 40 a 60%	de 60 a 80%	de 80 a 100%	de 100 a 120%	más de 120%

La depresión se incrementa gradualmente cuando la madera ha perdido la tercera parte de su contenido de humedad en estado verde, punto en que los esfuerzos comienzan a invertirse y la temperatura puede aumentarse progresivamente cuando el contenido de humedad promedio ha bajado a 30% o sea el PSF. Una vez que el contenido de humedad ha llegado a ese valor en el centro de la madera o en la parte más húmeda de ésta, la temperatura puede elevarse bruscamente al máximo sin peligro de deterioro.

Para formar un programa combinado de temperatura y depresión psicrométrica correspondiente a cada especie y grueso de madera, el operador debe tomar en cuenta las claves de las Tablas 3 y 4 siguientes.

Ejemplo, se trata de secar en horno una carga de mara de 1" de espesor, que tiene 80% de humedad inicial. Los pasos a seguir para elaborar el programa son:

- C El programa recomendado para esta especie y espesor de madera, según la Tabla 6 es T6-D4 que se anota en la parte superior, encabezando el formulario. Ver Tabla 5

Tabla 3: Programas Generales de Temperatura para Maderas Latifoliadas

PASO	%CH* al	TEMPERATURAS DEL TERMOMETRO SECO EN °C													
		Nº	Inic.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
1	+30	38	38	43½	43½	49	49	54½	54½	60	60	65½	71	76½	82
2	30	40½	43½	49	49	54½	54½	60	60	65½	65½	71	76½	82	88
3	25	40½	49	54½	54½	60	60	65½	65½	71	71	71	76½	82	88
4	20	46	54½	60	60	65½	65½	71	71	71	76½	76½	82	88	93
5	15	49	65½	71	82	71	82	71	82	71	82	82	82	88	93

* Contenido de humedad al iniciar el paso.

Tabla 4: Programas Generales de Depresiones Psicrométricas para Maderas Latifoliadas

PASO	DEPRESIONES DEL TERMOMETRO HUMEDO, °C														
	DEP Nº	CLASE DE MADERA SEGUN SU CH VERDE*						DEPRESIONES CORRESPONDIENTES AL Nº DEL PROGRAMA							
		A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+30	+35	+40	+50	+60	+70	1½	2	3	4	5½	8½	11	14	
2	30	35	40	50	60	70	2	3	4	5½	8	11	16½	19½	
3	25	30	35	40	50	60	3½	4½	6	8½	11	16½	22	28	
4	20	25	30	35	40	50	5½	8	10½	14	19½	28	28	28	
5	15	20	25	30	35	40	14	16½	19½	22	28	28	28	28	
6	10	15	20	25	30	35	28	28	28	28	28	28	28	28	

* Contenido de humedad al comienzo del paso.

FUENTE. L. M. Fiske. Manual de secado de la madera. Madrid.

- C Bosquejar un cuadro con ocho columnas que correspondan en orden secuencial a: número de paso de temperatura, número de paso de depresión de bulbo húmedo, contenido de humedad inicial de la madera, temperatura del bulbo seco (TBS), depresión psicrométrica) T, temperatura del bulbo húmedo (TBH), humedad relativa ambiente dentro del horno (HR) y contenido de humedad de equilibrio (CHE) de la madera. Las dos primeras columnas son optativas, pero ayudan a controlar la elaboración del programa.
- C Para anotar el CH inicial, se ingresa a la Tabla 3 en la columna correspondiente a T6 escribiendo el número de paso en la primera columna y el valor correspondiente a la temperatura en la cuarta columna. El primer paso de la TBS es válido para la madera húmeda y no cambia hasta que el material alcanzó el nivel de humedad de 30% (aproximadamente el PSF). En el caso del ejemplo, la TBS inicial es 49 oC; el paso No 2 y los subsiguientes se realizan cuando la madera es igual o menor a 30 % de contenido de humedad.
- C El primer paso de la depresión psicrométrica se encuentra en la Tabla 4, ingresando a las clases de madera, en el caso del ejemplo D4. En la columna D se encuentran los valores de CH de la madera en los cuales se verifican los cambios de depresión del bulbo húmedo. Estos se copian en su integridad en la columna número 3 del cuadro y los valores de) T (en caso del ejemplo, en la columna 4 de la Tabla 4) se copian en su integridad en la columna 5 del cuadro.
- C Para completar los pasos de TBS, se ingresa al paso 2 (y los subsiguientes de la Tabla 3), copiando los valores de TBS correspondientes a 30% y menores, hasta 15% (paso 5).
- C El máximo nivel de) T que permiten los programas es 28%: por tanto, los pasos 4 y 5 de temperatura, se repite el último paso de) T (paso 6), en este caso, 28 oC es la máxima depresión de bulbo húmedo.
- C Finalmente, la estructuración del programa finaliza llenando los valores de HR y CHE con la ayuda de la tabla del anexo 2; se interpolan los valores que correspondan. Se pueden verificar los datos así obtenidos con los que presenta la tabla del Anexo 3.

Todo programa del horno debe ser registrado en forma escrita antes de iniciar el secado. A menudo se requiere que el operador del horno haga algunas modificaciones, necesarias desde su propia observación, acerca de las condiciones de la carga. Para ello pueden ayudar las pautas que se mencionan en el inciso d.

Se puede apreciar que la mara pertenece a la clase D, cuando su contenido de humedad verde está entre 80 y 100%; si se toma el límite inferior, el primer cambio en depresión de 4 °C se efectúa cuando la madera ha perdido un tercio de su contenido de humedad verde, o sea al

llegar a aproximadamente 50% de CH mayor. De la forma descrita se pueden estructurar otros programas de acuerdo a la especie y espesor de la madera. En la Tabla 6 se enumeran los horarios propuestos para las maderas bolivianas. Estos provienen de dos fuentes: el Laboratorio de Productos Forestales de Madison (Anexo 3) y del Pacto Andino (clasificados en fuerte, moderado y suave, como se observa en el Anexo 4).

Los programas detallados en el Anexo 3 corresponden a especies bolivianas. Algunos de éstos tienen sugerencias de modificaciones, en base a la experiencia del citado Laboratorio de Productos Forestales. Para seleccionar allí un programa destinado a una especie determinada, por ejemplo madera aserrada de guayabochi de 1", se busca en la Tabla 6 la denominación guayabochi (nombre científico *Calycophyllum spruceanum*), allí se encuentra que se debe aplicar el programa (T2-C2). Si las piezas de madera fuesen de 2" se usaría el programa (T2-C1).

Tabla 5: Formación de un Programa de Secado en Horno para Mara de 1" de Espesor
Horario T6-D4

Paso de T°	Paso de Depr.	% de CH al Principio*	T° bulbo seco	Depresión Psi crométr.	T° bulbo húmedo	% de CHE*
1	1	+ 50	49	4	45	14,4
1	2	50	49	5½	43½	12,1
1	3	40	49	8½	40½	9,6
1	4	35	49	14	35	6,5
2	5	30	54½	22	32½	4,0
3	6	25	60	28	32	2,9
4	6	20	65½	28	37½	3,2
5	6	15	82	28	54	3,5

De igual modo, si la especie es mara macho (nombre científico *Cedrelinga catenaeformis*), en piezas de 1" se puede utilizar el programa moderado del Pacto Andino (Anexo 4). En este caso como en varios otros, no se dispone de un programa propuesto para piezas de 2". Para encontrar un horario aplicable a ese material más grueso, se puede emplear el método de aumentar la humedad relativa del horno que corresponde a cada paso del programa de 1", un 5% para 2" de espesor y de 10% para el caso de material con espesor 3". De todas formas, el secado de madera de más de 2" de espesor se torna impráctico por el largo tiempo que demora; en este caso, se recomienda sellar los extremos de las piezas con pintura al aceite y estacionar bajo techo las tablas antes de secarlas en horno.

D2. Lista de Horarios sugeridos para Maderas Bolivianas

La lista ha sido tomada de experiencias realizadas en el Laboratorio de Productos Forestales de Madison (Estados Unidos de Norteamérica), desde hace casi seis décadas y el Pacto Andino (ensayos realizados entre 1976 y 1981). Para mayor información consultar el "Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas".

Tabla 6: Peso Específico Básico, Densidad y Programas de Secado para Maderas Bolivianas

Nombre común	Nombre científico	12%	Peb*	Dad**	Horario***	
				1"	2"	
1. Ajipa, Jorori	<i>Swartzia sp.</i>	0,64	---		(T2-C2)	(T2-C1)
2. Amargo	<i>Simarouba amara</i>	0,36	---		Fuerte	----
3. Amarillo	<i>Aspidosperma sp.</i>	0,61	0,73		(T6-D2)	(T3-D1)
4. Azucaró, Cedrillo	<i>Spondias mombim</i>	0,36	---		Fuerte	
5. Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	0,20	---		(T10-D4S)	(T8-D3S)
6. Borracho, Guitarrero	<i>Didymopanax morototoni</i>	0,40	---		Fuerte	----
7. Cambará	<i>Erisma uncinatum</i>	0,46	0,57		(T1-D2)	----
8. Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,42	0,50		(T10-D4S)	(T8-D3S)
9. Copaibo	<i>Copaifera sp.</i>	0,60	0,70		MODERADO	----
10. Cuchi	<i>Astronium urundeuva</i>	1,00	1,22		(T1-B1)	----
11. Curupaú, Cebil	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	0,85	1,02		(T8-B3)	(T5-B1)
12. Cuta beniana	<i>Astronium graveolens</i>	0,86	---		(T3-C2)	----
13. Cuta blanca, Perilla	<i>Plylostylon sp.</i>	0,79	0,95		(T2-B2)	----
14. Gabún, Sangre de toro	<i>Virola boliviensis</i>	0,39	0,48		(T3-C2)	(T3-C1)
15. Guapi	<i>Guarea sp.</i>	0,58	---		(T6-D2)	(T3-D1)
16. Guayabochi	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	0,75	0,91		(T2-C2)	(T2-C1)
17. Isigo	<i>Protium sp.</i>	0,54	---		(T3-C2)	(T3-C1)
18. Japunaqui	<i>Cordia sp.</i>	0,66	---		(T6-D2)	(T3-D1)
19. Jichituriqui, Gabetillo	<i>Aspidosperma pyriforme</i>	0,73	0,89		(T6-D2)	(T3-D1)
20. Laurel amarillo	<i>Nectandra sp.</i>	0,45	0,53		SUAVE	
21. Mapajo	<i>Ceiba pentandra</i>	0,51	0,62		(T10-D5S)	(T8-D4S)
22. Mara	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,43	0,54		(T6-D4)	(T3-D3)
23. Mara macho	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	0,46	0,57		MODERADO	----
24. Momoqui	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,89	1,05		(T3-C2)	(T3-C1)
25. Mora	<i>Chlorophora tinctoria</i>	0,81	0,96		MODERADO	----
26. Morado del Beni	<i>Peltogyne porphyrocardia</i>	0,86	---		(T6-D2)	(T3-D1)
27. Morado Chiquitos	<i>Peltogyne sp.</i>	0,84	0,99		(T6-D2)	(T3-D1)
28. Mururé, Mascajo	<i>Clarisia racemosa</i>	0,61	0,70		SUAVE	----
29. Nogal	<i>Juglans australis</i>	0,50	0,59		(T6-D4)	(T3-D3)
30. Nuí u ojoso colorado	<i>Pseudolmedia laevigata</i>	0,76	0,90		MODERADO	----
31. Ochoo, Solimán	<i>Hura crepitans</i>	0,44	0,52		(T6-D2)	(T3-D1)
32. Palo blanco, Verdolaga	<i>Calycophyllum multiflorum</i>	0,64	0,78		(T2-C2)	(T2-C1)
33. Palo maría	<i>Calophyllum brasiliense</i>	0,55	0,66		(T2-D4)	(T2-D3)
32. Paquí	<i>Hymenaea courbaril</i>	0,77	---		(T3-C2)	(T3-C1)
34. Picana negra	<i>Cordia spp.</i>	0,66	---		(T6-D2)	(T3-D1)
36. Quebracho colorado	<i>Schinopsis quebracho-colorado</i>	1,04	1,22		(T1-B1)	----
35. Quina quina	<i>Myroxylon peruiferum</i>	0,80	0,97		SUAVE	----
37. Sirari	<i>Ormosia sp.</i>	0,82	0,99		MODERADO	----
38. Soto	<i>Schinopsis spp.</i>	1,07	1,27		(T1-B1)	----
39. Sujo	<i>Sterculia striata</i>	0,45	0,52		(T2-D4)	(T2-D3)
40. Tajibo, Lapacho	<i>Tabebuia spp.</i>	0,85	0,98		(T3-C1)	----
41. Tarara colorada	<i>Platymiscium sp.</i>	0,65	0,73		(T2-B2)	----
42. Tejeyeque	<i>Centrolobium tomentosum</i>	0,58	0,70		(T6-D2)	(T3-D1)
43. Trompillo	<i>Guarea trichilioides</i>	0,58	---		(T6-D2)	(T3-D1)
44. Verdolago	<i>Terminalia amazonia</i>	0,66	0,80		(T3-C2)	(T3-C1)
45. Wewey	<i>Clarisia racemosa</i>	0,61	0,70		SUAVE	----
46. Yesquero	<i>Cariniana sp.</i>	0,56	0,68		(T3-D2)	(T3-D1)

*) Peso específico básico (peso seco al horno/volumen verde)
 **) Valor en g/cm³, madera seca al 12% de C.H.
 ***) Horarios sugeridos para piezas de 1" y 2" de espesor. Ver anexos 3 y 4.

Los datos de peso específico básico y densidad fueron obtenidos de diferentes fuentes: "Maderas de Bolivia" (1992), informes no publicados de G. Cerrogrande (1982); Harriague, Villalpando y Quinteros de Burgos (?); UMSA (1974) y algunos datos del autor.

Muchas especies no están consideradas en esta lista y requieren de un horario para su secado en hornos. La experiencia acumulada en el secado de otras especies puede permitir que un operador estructure y use un programa adecuado para resolver casos especiales.

D3. Aplicación del Programa de Secado

Los horarios se aplican de acuerdo al contenido de humedad de las muestras de secado ubicadas dentro de la carga de madera. Para decidir cuándo deben cambiarse las condiciones del horno, se determina el contenido de humedad de la mitad más húmeda de las muestras; ese valor guía en todo momento los pasos del programa. Algunos operadores se guían por la muestra más húmeda y realizan los cambios cuando el nivel de humedad se acerca a uno o dos por ciento del valor de contenido de humedad especificado por el paso del programa.

D4. Modificación de los Programas

Una vez que el operador ha secado con un programa una serie de cargas de una especie, sin causar deterioro, puede proceder a modificarlo en forma sistemática para reducir el tiempo empleado en el secado.

El primer paso para estos cambios, es modificar a otro horario de depresión psicrométrica, con los valores correspondientes a la letra siguiente de la Tabla 4, si la especie por secar tiene un contenido de humedad verde cercano al límite superior de su clase. Por ejemplo, si la mara tuviera un contenido de humedad verde de 95% se podrían usar fácilmente los valores presentados bajo E en lugar de D, pero con el mismo número de depresión 4, obteniéndose así la clave E4, en vez de la D4.

El segundo paso consiste en emplear el siguiente número de depresión, dejando la última letra. En el caso del ejemplo de la mara, la nueva clave de depresión sería E5 en lugar de E4. Este paso puede ocasionar grietas en la superficie y extremidades, que no serían de mucha importancia en el uso final de la madera y, en cambio, el ahorro en tiempo resulta ser significativo.

Finalmente, otro tipo de cambio aconsejable es aumentar la temperatura del bulbo seco en las últimas etapas del secado. Después de que el contenido de humedad de las muestras ha bajado a 15% o menos, la temperatura se puede elevar sin mayores daños para la madera.

Ejercicios:

Preparar los horarios de secado en horno para las especies: ajipa, cuchi, gabún, ochoó y sujo. Considerar madera de 1" y 2" de espesor.

D5. Programas para Madera Secada al Aire

Las maderas secas al aire pueden entrar directamente en los programas recomendados en la Tabla 6, a menos que sus superficies se encuentren mojadas por la lluvia o la madera haya sido expuesta prolongadamente a elevadas humedades relativas. En este caso, se recomienda usar una depresión psicrométrica de 4 a 5,5 °C durante las primeras 12 a 24 horas, dependiendo de la cantidad de agua absorbida, con anterioridad a la aplicación del programa.

La madera seca al aire no debe someterse a humedades relativas muy elevadas, ni a tratamientos con vapor muy caliente por el riesgo de esfuerzos de compresión que pueden causar la intensificación de las rajaduras y agrietamientos superficiales. Además existe tendencia a las torceduras.

E. Calentamiento e Inicio de la Operación del Horno

- C El calentamiento del horno se realiza con vapor saturado a una tasa de 5 °C por hora para maderas livianas de 2" de espesor y 2 °C por hora para maderas pesadas del mismo espesor o maderas más gruesas; en caso de madera de 1" de grosor, las tasas son 6 °C por hora (maderas livianas) y 3 °C por hora (maderas pesadas). La elevación se aplica hasta alcanzar la temperatura del primer paso del programa; para ello se fija el termostato al mismo nivel de temperatura del termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo.
- C Seguidamente se acciona el paso del vapor a las principales cañerías de distribución que alimentan los vaporizadores y radiadores.
- C Abrir las ventanillas de inspección y accionar los ventiladores por 5 a 10 minutos, luego cerrar las ventanillas.
- C Operar los instrumentos de control eléctricos.
- C Purgar las cañerías de vapor para remover el agua y la suciedad acumulada.
- C Las chimeneas o ventilas se mantienen cerradas durante el calentamiento del horno. Estas chimeneas se van abriendo progresivamente hasta su totalidad en las etapas más avanzadas del secado.
- C Una hora después de que el TBS alcanzó la temperatura inicial del programa se fija la TBH al valor que corresponda, según el inicio del programa se prosigue con éste, controlando las muestras de secado hasta el momento de ejecutar el equilibrado.

F. Tratamientos de Igualación y Acondicionamiento

F1. Igualación o Equilibrado

El igualado se realiza de la siguiente manera:

- C Se inicia cuando el contenido de humedad de la muestra más seca del horno es un 2% más bajo que el contenido de humedad promedio que se busca al final del secado. En el ejemplo de la Tabla 5, cuando se desea un contenido de humedad final de 10%, el tratamiento de igualado empieza cuando la muestra más seca llegue a 8%.
- C Se establece una temperatura y humedad relativa dentro del horno que corresponda al contenido de humedad de la muestra más seca. En el caso del ejemplo, se emplea la temperatura más alta que permita el programa, fijando una depresión psicrométrica que corresponda a un 8% de humedad en la madera. En este caso, la TBS=82 °C y se ve en el Anexo 2 que para un CHE=8%, la depresión psicrométrica es 10 °C o sea, la TBH se fija en 72 °C. Ello permite elevar la HR dentro del horno de 25% a 64%
- C Se continúa el tratamiento de igualado hasta que la muestra más húmeda alcanza el promedio final buscado de contenido de humedad del material. En el ejemplo es el 10%.

F2. Acondicionamiento

Logrado el tercer paso del igualado, el tratamiento de acondicionado se aplica de la siguiente forma:

- C Mantenga la temperatura del horno como en el paso final del programa a menos que la depresión psicrométrica buscada no pueda establecerse a esa temperatura. En ese caso, disminuya la temperatura del bulbo seco al valor que tenía el horno unas 12 horas antes de iniciado el acondicionamiento.
- C Establezca una humedad relativa que proporcione un contenido de humedad de equilibrio de la madera de aproximadamente un 4% por encima del promedio final buscado de contenido de humedad. En el caso del ejemplo, para un nivel de humedad del 10% que se pretende conseguir en las piezas, a una temperatura de 82 °C la madera será acondicionada a un contenido de humedad de 14%. Según la tabla del Anexo 2 la humedad relativa necesaria es aproximadamente 87%, que se alcanza con una depresión psicrométrica de 3,5 °C.
- C El tratamiento de acondicionado continúa hasta que las tensiones se hayan liberado, ver la figura 11.

G. Pruebas Finales de Control de Humedad, su Distribución y las Tensiones de la Madera

Después de que se ha secado en el horno una determinada carga de madera, se cortan tres secciones de 1" de cada muestra del horno secador y 6 a 9 secciones de otros tablones en una carga completa del horno, para comprobación definitiva. Estas muestras se destinan a las pruebas finales de contenido de humedad promedio, para la distribución de la humedad periférica y del centro de la tabla, y para las pruebas de tensión en la madera (pruebas de tenedor). Las secciones deben ser cortadas a una distancia de por lo menos 15 cm del extremo en caso de las muestras de secado y a 60 cm del extremo de las tablas y tablones. Los detalles de tipo de corte y tamaño de la sección son mostradas en la figura 10.

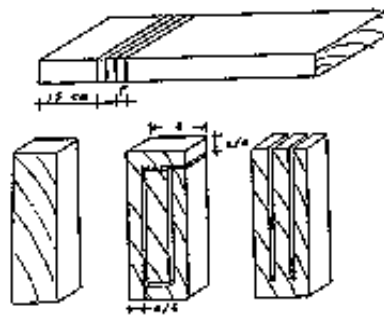


Figura 10: Método de corte y tamaño de la probeta para determinar el CH, su distribución y las tensiones de la madera

Una guía para la evaluación preliminar de las pruebas de esfuerzos o tensiones de la madera, se presenta en la figura 11.

- C Si al momento del corte, las pinzas externas del tenedor se curvan hacia adentro esto es una indicación de que la madera tiene esfuerzos de compresión en la superficie de la pieza y de tracción en el interior. El tratamiento de acondicionado debe continuar.

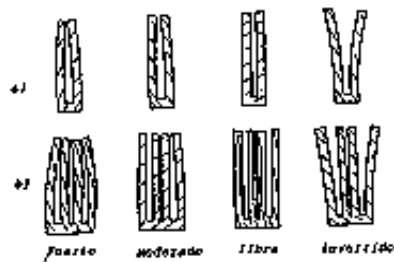


Figura 11: Pruebas de tensiones o esfuerzos de la madera

- C Si las pinzas se mantienen rectas o muy ligeramente curvadas hacia afuera, la madera está prácticamente libre de esfuerzos y el secado se da por concluido.
- C Finalmente, si las pinzas del tenedor se curvan visiblemente hacia afuera, los esfuerzos se han invertido, la superficie de la pieza está bajo tracción y el interior en compresión. Esto indica un exceso de humedad de la madera durante el acondicionado.

Las conclusiones finales de las pruebas de tensiones o esfuerzos de la madera se dan después de 24 horas que los tenedores y las tablas se han mantenido bajo techo o en un cuarto y se puede observar que:

1. Las pinzas exteriores del tenedor se han torcido considerablemente hacia adentro; lo que indica que el material todavía presenta tensiones por distribución irregular de la humedad y el tratamiento de acondicionado de la próxima carga del mismo tipo de material debe prolongarse por más tiempo.
2. Las pinzas exteriores del tenedor están rectas; la madera está libre de tensiones. El secado fue correctamente ejecutado y las próximas cargas deben tener el mismo tiempo de acondicionado.
3. Las pinzas exteriores del tenedor se han torcido hacia afuera; el material ha tenido una inversión de tensiones. La próxima carga de un material similar deberá ser acondicionada a una humedad relativa más baja o durante un tiempo más corto.

H. Fin del Proceso y Descarga del Horno

Después de que se ha constatado la liberación de esfuerzos en la madera y el fin del período de acondicionamiento, se corta el ingreso del vapor a los serpentines de calentamiento y cañerías de vaporización y se apaga el horno dejando las puertas cerradas hasta que la temperatura de bulbo seco al interior registre un valor no mayor a unos 10 °C que la temperatura ambiente exterior. En ese momento se pueden abrir las puertas del horno y descargar la madera.

I. Control del Horno

Las condiciones de temperatura y humedad dentro del horno deben ser manipuladas frecuentemente según los requerimientos del horario particular en uso y por ello, es esencial disponer de un control exacto de las condiciones de secado en todo momento.

El control de las condiciones de la cámara de secado puede ser realizado por equipo automatizado o manual. Estos principalmente se dirigen a la medición de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Para ello, se emplean termómetros de mercurio o termocuplas, psicrómetros manuales y anemómetros, en diferentes lugares del horno.

La velocidad del aire a través de la carga varía entre 1,2 y 2,2 metros por segundo. Para asegurar que tal circulación sea uniforme a través del horno, es esencial que:

1. Las puertas sean tan herméticas como sea posible de modo que tanto el revestimiento interior como el exterior estén colocados de forma que se eviten pérdidas de aire.
2. Los ventiladores funcionen a una velocidad constante predeterminada y sin patinar.
3. La pila esté correctamente edificada y que no hayan listones en posición de impedir la circulación de aire.
4. Las chimeneas estén correctamente construidas para prevenir cortocircuitos de aire, de modo que éste circule a través de la carga.

Los cortocircuitos de aire se pueden evitar obstruyendo el paso del aire en espacios mayores dejados en el horno durante el apilado (por ejemplo, entre los paquetes), en las partes superior, inferior y los extremos de la carga. Para ello, se emplean trozos de venesta (madera terciada) perforada, tablas y tabloncillos de grados inferiores.

Los hornos más modernos de corriente forzada están dotados de ventiladores, con dirección de rotación reversible. Esto facilita el secado en el centro de la pila. El cambio en la dirección de la rotación de los ventiladores es importante en los últimos estados del secado.

J. Tiempo de Secado

El tiempo requerido para secar una carga de tablas depende de:

- C las características de la madera,
- C el tipo de horno, y
- C el programa de secado empleado.

El operador del horno ajusta el programa de secado según el tipo de madera. Respecto al segundo factor, se puede mejorar el desempeño de los hornos optimizando algunas características de éste (caso del aislamiento térmico y sistema de ventilación), que pueden resultar en una disminución del tiempo de secado. Pero, la mayor reducción de ese tiempo se puede conseguir a través de los ajustes a los programas de secado.

SECCION IV

DEFECTOS DE SECADO

A. Agrietamiento y Rajaduras

A1. Grietas Superficiales

Ocurren en las caras de las tablas durante las primeras etapas del secado. Las causas más comunes del agrietamiento superficial son el rápido secado en las primeras etapas del estacionamiento o la súbita aplicación de un severo aumento en la tasa de secado, en las últimas etapas. Frecuentemente los lados de las grietas se cierran en la superficie al final del proceso, cuando se invierten los esfuerzos y no son visibles en la superficie hasta que la tabla sea cepillada.

Una segunda causa del agrietamiento superficial es la aplicación de un tratamiento de elevada humedad a tablas cuyo centro ha secado bajo el punto de saturación de las fibras, seguido de un rápido resecado de la superficie. Por ejemplo, este problema puede ser causado por humedecimiento debido a la lluvia y un subsecuente rápido resecado.

A2. Grietas Internas

Comienzan generalmente en las últimas etapas del secado como resultado directo de rigurosas condiciones de secado en las primeras etapas, que originan esfuerzos intensos de tensión en la superficie y de compresión en el centro. Las grietas se generan en el interior de la tabla pudiendo extenderse hasta la superficie. El excesivo agrietamiento interno se denomina "apanalamiento".

A3. Rajaduras

Son separaciones longitudinales de las fibras que atraviesa de una cara a la otra de la pieza. Ocurren en los extremos de una tabla debido a una rápida pérdida de agua que origina esfuerzos de tensión. De todos los agrietamientos experimentados, éste es probablemente el más común y severo.

A4. Prevención del Agrietamiento

El método adecuado de prevención del agrietamiento es aplicar las condiciones de secado más apropiadas para cada especie a ser secada. La severidad de los esfuerzos puede ser controlada por la condición de gradiente de humedad, la cual depende de la depresión del bulbo húmedo; por ello, en la mayoría de los casos, los primeros estados del secado deberían ser llevados a altas humedades relativas, o sea, utilizando una pequeña depresión psicrométrica.

Si las grietas son severas, se debe someter la carga a un corto tratamiento de elevada humedad a una temperatura de bulbo seco de alrededor de 11 °C, más alta que la utilizada, con una depresión de bulbo húmedo de no más de 3 °C. La duración de este tratamiento no se prolongará más de 1 ó 2 horas, lo suficiente sólo para que las capas exteriores tomen 1 ó 2% de contenido de humedad y luego resecar en condiciones menos severas que las empleadas antes del tratamiento de elevada humedad.

El agrietamiento y rajaduras de los extremos se puede también evitar por el sellado de los extremos de las tablas con una adecuada pintura impermeabilizante.

A5. Colapso

Es una contracción anormal que se presenta en la madera por encima del punto de saturación de las fibras, que distorsiona la pieza. Ocurre cuando se emplean elevadas temperaturas al principio o en etapas intermedias de la remoción del agua libre. Su apariencia es similar al apanamiento; la superficie de la tabla aparece distorsionada debido al aplastamiento de sus células en una intensidad variable, dependiendo de la severidad del colapso.

En muchas maderas, como la balsa o el cedro y particularmente en los cortes radiales, las tablas asumen una apariencia corrugada o acanalada. En este caso el colapso viene acompañado del apanado y en otros casos grietas de forma de diamante en las tablas (grietas rómbicas). En otras maderas, como el caso del mapajo, los cantos de las tablas pueden no colapsar apreciablemente, pero la superficie puede mostrar una depresión irregular en el centro. Si no se observa el colapso después del secado de la madera verde hasta el punto de saturación de las fibras, se puede asumir que las especies tratadas no son colapsables.

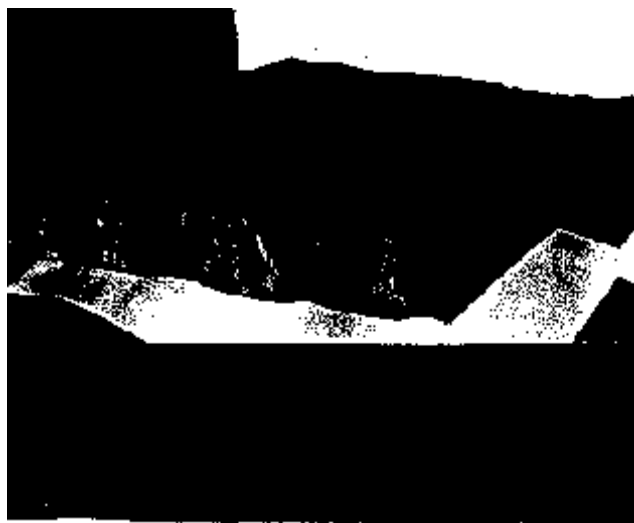


Figura 12: Ejemplo de agrietamiento interno y colapso en cedro (Cedrela sp)

A6. Remoción del Colapso

La madera que colapsa durante el secado, puede, en la mayoría de los casos, ser restaurada a su forma normal por aplicación del tratamiento de reacondicionado. Este proceso es ejecutado en una cámara de concreto reforzado, armada para este propósito, y consiste en someter la madera a un tratamiento de vaporizado entre 80 °C y 100 °C bajo condiciones saturadas. El procedimiento usualmente adoptado, es el siguiente:

Cuando el contenido de humedad ha disminuido hasta cerca el 18%, la carga a ser reacondicionada se ubica en la cámara de reacondicionamiento, apilada con separadores como para el secado en hornos. Luego se ingresa vapor caliente a la cámara por un período lo suficientemente largo como para restablecer la tabla a su forma normal o, en el caso donde no existe un colapso intenso, hasta que no haya ganancia en dimensiones. El tiempo requerido en el último caso debe ser determinado experimentalmente.

Investigadores australianos recomiendan que la madera secada al horno se enfríe completamente antes de iniciar el tratamiento de vaporizado. Además, mencionan la conveniencia de que la carga sea enfriada antes de removerla de la cámara de acondicionado.

Durante este tratamiento, la madera absorbe una cierta cantidad de agua y, por ello, su contenido de humedad aumenta en 3 ó 4%; esta agua debe ser removida retornando la carga al horno o secándola al aire libre. Si la severidad del colapso es alta, afecta la elasticidad natural de la madera y es poco probable conseguir alguna mejoría de esta condición al aplicar el vaporizado. Los resultados del reacondicionamiento son permanentes y después de resecar la madera, ésta mantendrá la forma adquirida.

Las dimensiones de las tablas reacondicionadas pueden ser aumentadas por el tratamiento hasta el tamaño que podría resultar de la contracción normal, pero bajo ninguna circunstancia será recobrado el tamaño original de la carga verde con el tratamiento de vaporizado de la carga colapsada.

El reacondicionamiento puede ser empleado también para remover el combado, encorvado y revirado, los cuales ocurren frecuentemente en tablas anchas de corte tangencial. Se reitera la necesidad de tener particular cuidado en la construcción de las pilas y, de ser posible, colocar contrapesos sobre la pila cuando se aplica el vaporizado en el reacondicionamiento.

A7. Torceduras

El término "torceduras" generalmente se considera en alguno de los siguientes casos (ver Fig. 13).

- a. Acanaladura o abarquillado, que es la tendencia de algunas tablas de corte plano a desarrollar una curvatura a lo ancho de la pieza.
- b. Revirado, es la distorsión en el largo de la pieza.
- c. Combadura o arqueado, cuando la curvatura se encuentra a lo largo de la cara de la tabla.
- d. Encorvadura, que es la curvatura del lado o canto de una tabla.

Probablemente, el mayor factor causante de torceduras sea el apilado incorrecto. Cuando la madera está sujeta a una alta temperatura, se vuelve más plástica y, por ello, adopta la forma que le dictan los esfuerzos aplicados a ella y de ahí se puede ver que, si el espaciamiento de los separadores en una pila no está alineado verticalmente, el peso de la madera sobre una tabla particular ocasiona que la pieza se flexione alrededor del separador que está desalineado. La madera que está en esa posición adquiere deformaciones permanentes.

En forma similar, si los espaciamientos de los separadores son muy grandes la tabla puede tender a hundirse entre ellos.

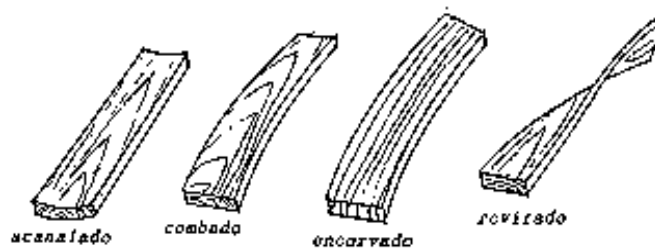


Figura 13: Torceduras en la madera

La variación en la tasa de contracción radial y tangencial es generalmente responsable de la tendencia de las tablas anchas de corte plano a desarrollar acanaladuras. En este caso, la cara de la tabla cerca al centro del tronco se aproxima más a un corte radial, comparado con las superficies opuestas y por ello se contrae menos en ancho y a esto se deben las diferencias, ya que los cantos exteriores de la tabla tienden a curvarse desde el centro o corazón.

A8. Prevención y Remoción de las Torceduras

De lo anterior se puede deducir que el método más efectivo de minimizar las torceduras es que las pilas estén cuidadosa y exactamente construidas y que los separadores sean de un espesor

uniforme, igualmente espaciados y en un perfecto alineamiento vertical sobre el centro de los apoyos. Luego, cuando la madera a ser secada es mayormente de corte plano o de una especie susceptible a las torceduras, los separadores deben ser ubicados lo más cercanos entre sí.

Si a pesar de las precauciones ocurren las torceduras, éstas pueden ser eliminadas aplicando el tratamiento de vaporizado. Este debe ser ejecutado cuando la carga ha alcanzado el contenido de humedad final deseado y en un período de tiempo suficiente como para enderezar las piezas. La carga debería entonces ser enfriada y se debe evaporar la humedad absorbida por la madera durante el reacondicionamiento, antes de que los pesos sean removidos.

B. Defectos causados por Infección de Hongos e Insectos

A veces se desarrollan manchas de hongos por las condiciones particulares del horno y su funcionamiento a bajas temperaturas iniciales, lo que favorece el desarrollo de hongos. Peck, del Laboratorio de Productos Forestales de Estados Unidos de Norteamérica, recomienda el vaporizado a 55 °C durante una hora para evitar la acción de los mohos.

C. Manchas Químicas

Los cambios de color causados por reacciones químicas pueden presentarse en alguna magnitud en la madera que está en contacto directo con los listones. En otras ocasiones, las maderas blancas se tiñen de una coloración café en la superficie o en zonas cercanas a ella. A veces este defecto interactúa con la presencia de hongos manchadores que infectan la madera antes del secado en hornos.

El caso del sáмого de ochoó, que por debajo de la superficie se mancha de un color azul verdoso claro, parece corresponder a este tipo de defecto, según las investigaciones que se han realizado hasta el momento.

SECCION V
ALMACENAMIENTO DE LA MADERA SECA

Después del secado en hornos, la madera frecuentemente se almacena en pilas sin separadores hasta el momento de uso. Si el estacionamiento es por un lapso menor a 30 días en cuarto cerrado, se espera que habrá poco cambio en el nivel de humedad de la carga.

Puede modificarse el nivel, si el almacenamiento es por varios meses y en lugares que no tengan las condiciones para mantener constante la humedad de equilibrio de la madera. En sitios muy secos la madera tenderá a disminuir su contenido de humedad y en lugares de mayor humedad relativa, no se podrá impedir el aumento del nivel de agua en las piezas.

La madera de exportación, tanto aserrada (tablas, tablones) como semielaborada (puertas sin barniz, chapa y láminas), se embarca para exportación cubierta de polietileno, para evitar la acción de ambientes muy húmedos o muy secos, que pudieran afectar al material.

SECCION VI
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anónimo. 1976. Secado al horno. División de Tecnología de la Madera e Investigación Forestal, New South Wales. (En Inglés).

Boone R.S.; Kozlik, K.J.; Bois, P.J.; Wengert, E.M. 1988. Horarios de Secado al Horno para Madera Comerciales de Clima Templado y Tropical. Lab. de Prod. Forestales, Reporte Técnico General FPL-GTR-57. Madison. (En inglés).

Brotero, F.A. 1944. Secado de la Madera en Horno. IPT, Boletim N° 27. (En portugués).

Fernández, G. 1962. El Estufado de la Madera. México.

Fiske, L. Manual de Secado de la Madera. Sindicato Nacional de la Madera, Madrid.

Hoheisel y colaboradores. 1989. Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena. Lima.

Peck, E. 1962. Secado de Madera. AID, México.

Rasmussen, E.F. 1960. Manual del Operador del Horno de Secado. Lab. Prod. Forestales. Manual de Agricultura N° 188, Washington. (En Inglés).

Villière, A. 1964. Secado de Maderas. Dunod, París. (En Francés).

ANEXOS

CONTROL FINAL DE LA HUMEDAD Y LAS TENSIONES - FORMULARIO 3-

ESPECIES..... HORNO N°..... CARGA N°.... PROGRAMA.....FECHA INICIO.....FECHA CONCLUSION.....

Fecha de prueba	Muestra N°	Humedad Periférica			Humedad Central			Promedio			Pruebas de Tensión	Notas
		Pi,g	Pf,g	CH,%	Pi,g	Pf,g	CH,%	Pi,g	Pf,g	CH,%		

Pi = peso inicial; Pf = peso final; g = gramos; CH = contenido de humedad en %

Anexo 2: Humedad Relativa Ambiente y Contenido de Humedad de Equilibrio de la Madera para Diferentes Temperaturas del Bulbo Seco y Depresiones del Bulbo Húmedo

T °C	Humedad %	Diferencia Psicrométrica en °C																					
		1	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	25	28
5	H.R.	86	79	72	65	58	52	45	39	33	20	7											
	C.H.E.,	19	16	14	12	11	9.5	8.5	7.5	6.5	4.5	1.5											
15	H.R.	90	85	80	75	71	66	61	57	53	44	36	27	20	13								
	C.H.E.,	20.5	18	16	14.5	13	12	11	10.5	10	8	7	6	4.5	3								
25	H.R.	92	88	84	81	77	74	70	67	63	57	50	44	39	33	22	12						
	C.H.E.,	21.5	19.5	17.5	16	15	14	13	12	11.5	10	9	8	7.5	6.5	5	2.5						
35	H.R.	94	90	87	84	81	78	75	72	69	64	59	54	49	44	36	28	20	13	7			
	C.H.E.,	22	19.5	18	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12	11	10	9.5	8.5	8	6.5	6	4	3	1.5			
40	H.R.	94	91	88	85	82	80	77	74	72	67	62	57	53	48	40	33	26	20	14	6		
	C.H.E.,	22	19.5	18	17	16	15	14	13	12.5	11.5	10.5	9.5	9	8	7	6	5	4	3	1.5		
45	H.R.	94	91	88	85	83	80	78	75	73	69	64	60	56	52	44	37	30	25	19	14		
	C.H.E.,	22	19.5	18	17	15.5	15	14	13.5	12.5	11.5	10.5	10	9	8	7	6.5	5.5	4.5	4	3		
50	H.R.	95	92	89	86	83	81	79	76	74	70	65	61	58	54	46	40	34	29	24	18	12	5
	C.H.E.,	22	19.5	18	16.5	15.5	15	14	13.5	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	6.5	5.5	5	4	3.5	2.5	1
55	H.R.	95	92	90	87	84	82	80	78	76	72	67	63	60	56	50	43	37	32	27	22	16	10
	C.H.E.,	21.5	19.5	18	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	6.5	6	5	4.5	4	3	2
60	H.R.	95	92	90	88	85	83	81	79	77	73	69	65	61	58	52	45	40	35	30	25	20	14
	C.H.E.,	21.5	19	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	7	6	5.5	4.5	4	3.5	2.5
65	H.R.	95	93	91	88	86	84	82	80	78	74	70	66	63	60	53	47	42	37	32	28	22	17
	C.H.E.,	21	19.5	17	16	15	14	13.5	13	12.5	11.5	10.5	10	9	8.5	7.5	7	6	5.5	5	4	3.5	3
70	H.R.	96	93	91	88	86	84	83	81	79	75	71	68	65	61	55	50	44	40	35	31	25	20
	C.H.E.,	20.5	18.5	17	15.5	15	14	13.5	13	12	11	10.5	9.5	9	8.5	7.5	7	6	5.5	5	4.5	3.5	3
75	H.R.	96	93	91	89	87	85	83	82	80	76	72	69	66	63	57	51	46	41	38	33	28	22
	C.H.E.,	20	18	16.5	15.5	14.5	14	13	12.5	12	11	10	9.5	9	8.5	7.5	6.5	6	5.5	5	4.5	3.5	3
80	H.R.	97	93	91	89	87	86	84	82	81	77	74	70	67	64	59	53	48	43	40	36	30	25
	C.H.E.,	19.5	17.5	16	15	14.5	13.5	13	12.5	12	11	10	9.5	8.5	8	7.5	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.5
85	H.R.	97	93	91	90	88	86	84	82	81	78	74	71	68	65	60	54	49	45	41	38	32	27
	C.H.E.,	19.5	17	16	15	14	13.5	12.5	12	11.5	10.5	10	9	8.5	8	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.5

To = Temperatura del bulbo seco , (oC); HR = Humedad relativa (%), CHE = Contenido de humedad de equilibrio (%)
Fuente: Hoheisel y colaboradores (1989).

Anexo 3: Programas de Secado Artificial sugeridos por el Laboratorio de Productos Forestales de Madison, EE.UU. para algunas Maderas Tropicales

El listado está referido a los programas para las diferentes maderas mencionadas en el texto. Esta información fue extraída de la publicación: "Dry kiln schedules for commercial woods - temperate and tropical" por R. Sidney Boone, Charles J. Kozlik, Paul J. Bois y Eugene M. Wengert, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR 57. Los números de tabla son los que menciona la publicación original.

Tabla 1 T1-B1 (modificado)

Tabla 3 T1-D2 (modificado)

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD%					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 35	37,5	36,0	90	19,5	> 50	37,5	35,5	86	17,6
2	35-30	37,5	35,5	86	17,6	50-40	37,5	35,0	83	16,4
3	30-25	40,5	37,0	81	15,4	40-35	37,5	33,5	74	13,4
4	25-20	40,5	35,0	69	12,0	35-30	37,5	32,0	68	11,9
5	20-15	46,0	32,0	38	6,4	30-25	40,5	32,0	56	9,4
6	15-final	49,0	32,0	32	5,5	25-20	40,5	32,0	56	9,4
7						20-15	46,0	32,0	38	6,4
8	igualar y acondicionar según necesidad. Ver					15-final	49,0	32,0	32	5,5
9	Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver				
						Tablas A1 y A2				

Tabla 4 T2-B2

Tabla 5 T2-C1 (modificado)

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 35	37,5	35,5	86	17,5	> 40	37,5	36,0	90	19,5
2	35-30	37,5	35,0	83	16,4	40-35	37,5	35,5	86	17,6
3	30-25	43,5	39,0	76	13,6	35-30	37,5	34,5	80	15,3
4	25-20	49,0	41,0	62	9,9	30-25	43,5	37,5	70	12,0
5	20-15	54,5	37,5	35	5,7	25-20	49,0	35,0	40	6,5
6	15-final	65,5	37,5	18	3,2	20-15	54,5	32,0	22	4,0
7						15-11	65,5	40,5	23	3,8
8	igualar y acondicionar según necesidad. Ver					11-final	71,0	43,5	21	3,4
9	Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver				
						Tablas A1 y A2				

Tabla 6 T2-C2 (modificado)

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 40	37,5	36,0	90	19,5	> 50	37,5	35,0	83	16,4
2	40-35	37,5	35,5	86	17,6	50-40	37,5	34,0	77	14,3
3	35-30	40,5	37,0	81	15,4	40-30	37,5	32,0	68	11,9
4	30-25	40,5	35,0	69	12,0	30-25	43,5	32,0	46	7,6
5	25-20	46,0	32,0	38	6,4	25-20	49,0	32,0	32	5,5
6	20-15	49,0	32,0	32	5,5	20-15	54,5	32,0	22	4,0
7	15-final	65,5	37,5	18	3,2	15-final	65,5	37,5	18	3,2
8	igualar y acondicionar según necesidad. Ver					igualar y acondicionar según necesidad. Ver				
9	Tablas A1 y A2					Tablas A1 y A2				

Tabla 7 T2-D3 (modificado)

Tabla 8 T2-D4 (modificado)

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	37,5	36,0	90	19,5	> 40	43,5	41,5	90	19,1
2	50-40	37,5	35,5	86	17,6	40-35	43,5	41,0	87	17,6
3	40-30	40,5	37,0	81	15,4	35-30	43,5	40,0	81	15,2
4	30-25	40,5	35,0	69	12,0	30-25	49,0	43,5	72	12,1
5	25-20	46,0	32,0	38	6,4	25-20	54,5	40,5	43	6,7
6	20-15	49,0	32,0	32	5,5	20-15	60,0	32,0	15	2,9
7	15-final	65,5	37,5	18	3,2	15-final	71,0	43,5	21	3,4
8	igualar y acondicionar según necesidad. Ver					igualar y acondicionar según necesidad. Ver				
9	Tablas A1 y A2					Tablas A1 y A2				

Tabla 15 T3-C1

Tabla 16 T3-C2

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 40	43,5	41,0	87	17,6	> 50	43,5	41,5	90	19,1
2	40-35	43,5	40,5	84	16,3	50-40	43,5	41,0	87	17,6
3	35-30	43,5	39,0	76	13,6	40-35	43,5	40,0	81	15,2
4	30-25	49,0	41,0	62	9,9	35-30	43,5	37,5	70	12,0
5	25-20	54,5	37,5	35	5,7	30-25	49,0	35,0	40	6,5
6	20-15	60,0	32,0	15	2,9	25-20	54,5	32,0	22	4,0
7	15-final	71,0	43,5	21	3,4	20-15	60,0	32,0	15	2,9
8	igualar y acondicionar según necesidad. Ver					igualar y acondicionar según necesidad. Ver				
9	Tablas A1 y A2					Tablas A1 y A2				

Tabla 18 T3-D1 (modificado)

Tabla 19 T3-D2 (modificado)

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	43,5	41,0	87	17,6	> 50	43,5	40,5	84	16,3
2	50-40	43,5	40,5	84	16,3	50-40	43,5	39,5	78	14,2
3	40-35	43,5	39,0	76	13,6	40-35	43,5	37,0	68	11,6
4	35-30	43,5	35,5	60	9,9	35-30	43,5	32,5	48	7,9
5	30-25	49,0	32,0	32	5,5	30-25	49,0	32,0	32	5,5
6	25-20	54,5	32,0	22	4,0	25-20	54,5	32,0	22	4,0
7	20-15	60,0	32,0	15	2,9	20-15	60,0	32,0	15	2,9
8	15-final	71,0	43,5	21	3,4	15-final	71,0	43,5	21	3,4
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 20 T3-D3 (modificado)

Tabla 34 T5-B1

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	43,5	41,0	87	17,6	> 50	49,0	46,5	88	17,6
2	50-40	43,5	40,5	84	16,3	50-40	49,0	46,0	85	16,3
3	40-35	43,5	39,0	76	13,6	40-35	49,0	44,5	77	13,5
4	35-30	43,5	35,5	60	9,9	35-30	49,0	41,0	62	9,9
5	30-25	49,0	32,0	32	5,5	30-25	54,5	35,5	35	5,7
6	25-20	54,5	32,0	22	4,0	25-20	60,0	32,0	15	2,9
7	20-15	60,0	32,0	15	2,9	20-15	65,5	37,5	18	3,2
8	15-final	71,0	43,5	21	3,4	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 55 T6-D2

Tabla 56 T6-D4

PASO	CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %					CONT. TEMPERATURA °C HUMEDAD %				
	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.	HUM.%	B.SECO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	49,0	45,0	80	14,4	> 35	54,5	51,5	86	16,2
2	50-40	49,0	43,5	72	12,1	35-30	54,5	50,5	81	14,3
3	40-35	49,0	40,5	60	9,6	30-25	60,0	54,0	73	11,5
4	35-30	49,0	35,0	40	6,5	25-20	65,5	55,0	59	8,3
5	30-25	54,5	32,0	22	4,0	20-15	71,0	51,5	37	5,1
6	25-20	60,5	32,0	15	2,9	15-final	82,0	54,5	26	3,5
7	20-15	60,0	37,5	18	3,2					
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2					igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 70 T8-B3

Tabla 233 T8-D3S

PASO	CONT. HUM.%	TEMPERATURA °C		HUMEDAD %	
		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	54,5	51,5	86	16,2
2	50-40	54,5	50,5	81	14,3
3	40-35	54,5	48,5	71	11,5
4	35-30	54,5	46,0	62	9,6
5	30-25	60,0	49,0	55	8,0
6	25-20	65,5	51,5	49	6,8
7	20-15	71,0	54,5	43	5,8
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 234 T8-D4S

PASO	CONT. HUM.%	TEMPERATURA °C		HUMEDAD %	
		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	54,5	50,5	81	14,3
2	50-40	54,5	49,0	74	12,2
3	40-35	54,5	46,0	62	9,6
4	35-30	54,5	43,5	52	7,9
5	30-25	60,0	46,0	46	6,8
6	25-20	65,5	49,0	41	5,8
7	20-15	71,0	51,5	37	5,1
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 245 T10-D4S

PASO	CONT. HUM.%	TEMPERATURA °C		HUMEDAD %	
		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	60,0	56,0	82	14,2
2	50-40	60,0	54,5	75	12,0
3	40-35	60,0	51,5	64	9,6
4	35-30	60,0	49,0	55	8,0
5	30-25	65,5	51,5	49	6,8
6	25-20	71,0	54,5	43	5,8
7	20-15	76,5	57,0	39	5,1
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

Tabla 246 T10-D5S

PASO	CONT. HUM.%	TEMPERATURA °C		HUMEDAD %	
		B.SECCO	B.HUM.	REL.	EQUI.
1	> 50	60,0	56,0	82	14,3
2	50-40	60,0	54,5	75	12,0
3	40-35	60,0	51,5	64	9,6
4	35-30	60,0	49,0	55	8,0
5	30-25	65,5	51,5	49	6,8
6	25-20	71,0	54,5	43	5,8
7	20-15	76,5	57,0	39	5,1
8	15-final	82,0	54,5	26	3,5
9	igualar y acondicionar según necesidad. Ver Tablas A1 y A2				

TABLA A1 - TRATAMIENTOS DE IGUALACION SUGERIDOS PARA LATIFOLIADAS Y CONIFERAS (IGUALANDO AL CONTENIDO DE HUMEDAD PREFIJADO, MENOS 3 POR CIENTO)

Temperatura del bulbo seco °C	Temperatura del bulbo húmedo según el CH final prefijado				
	6%	7%	8%	9%	10%
54,5	29,5	32,5	35,5	38,5	41
60	33	37,5	40,5	43	46
65,5	37,5	39,5	46	49,5	51,5
71	43,5	47	51,5	55	57,5
76,5	48	52,5	56,5	60,5	63,5
82	54,5	58	62,5	66,5	69
87,5	60	64	69	72	75,5

TABLA A2 - TRATAMIENTOS DE ACONDICIONADO (LIBERACION DE ESFUERZOS) SUGERIDOS PARA MADERAS LATIFOLIADAS Y CONIFERAS*

Temperatura del bulbo seco °C	Temperatura del bulbo húmedo según el CH final prefijado				
	6%	7%	8%	9%	10%
60	52	53	54,5	55,5	56
65,5	57,5	59	60	61	61,5
71	63,5	65	66	66,5	67,5
76,5	69	70,5	72	72,5	73
82	75,5	76,5	77	78,5	79
87,5	81	82	83	84	85
93	86,5	87,5	89	90	90,5

* Si no se pueden mantener los ajustes exactos, hacer lo posible para obtener una depresión del Bulbo Húmedo y contenido de humedad de equilibrio, comparables

Anexo 4: Horarios de Secado practicados por el Pacto Andino en Maderas Regionales

Programa Fuerte (F): Para maderas latifoliadas de secado fácil

Contenido de humedad de la madera, en %	Temperatura en °C		Humedad relativa aproximada, en %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	60	56	80
60	65	58	70
50	70	60	60
40	75	61	50
30	80	62	40
20	80	60	35

Programa Moderado (M): Para maderas latifoliadas de secado lento o que sean propensas a sufrir ciertas deformaciones o agrietamientos

Contenido de humedad de la madera, en %	Temperatura en °C		Humedad relativa aproximada, en %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	50	47	80
60	55	49	70
50	60	51	60
40	65	52	50
30	70	54	40
20	70	50	35

Programa Suave (S): Para maderas latifoliadas de secado difícil

Contenido de humedad de la madera, en %	Temperatura en °C		Humedad relativa aproximada, en %
	Termómetro seco	Termómetro húmedo	
Verde	40	37	80
40	40	35	70
30	45	37	60
25	50	40	50
20	55	42	40
15	55	37	30

FUENTE: "Secado y Preservación de 105 maderas del Grupo Andino". Proyecto PADT-REFORT, Junta del Acuerdo de Cartagena, Lima, 1983.

Anexo 5: Cálculo de la Cantidad de Agua a ser Removida durante el Secado

La cantidad de agua (Q_a) extraída de la carga de madera desde estado húmedo (CH_1) hasta su secado en horno o al aire libre (CH_2), es:

$$Q_a = Q_{\text{agua1}} - Q_{\text{agua2}} = \frac{Peb \times Vv \times (CH_1 - CH_2)}{100}$$

Donde:
 Q_{agua1} = cantidad de agua a CH_1 , kg
 Q_{agua2} = cantidad de agua a CH_2 , kg
 Peb = Peso específico básico, kg/m^3
 Vv = volumen verde, m^3

Ejemplo:

Una carga de cambará de $100 m^3$ (aproximadamente 42.400 pies-tabla) con un contenido de humedad de 70% se desea secar en horno hasta un 10%. Cuál será la cantidad de agua a remover?

De la Tabla 3 de la Guía se encuentra que el peso específico del cambará es $0,46 g/cm^3$, lo que equivale a $460 kg/m^3$.

Aplicando la fórmula derivada anteriormente, se tiene

$$Q_a = \frac{460 \times 100 \times (70 - 10)}{100} = 21.600 \text{ kg o sea } 21,6 \text{ toneladas}$$

Ejercicios.

Encontrar Q_a si la carga de madera (21.200 pies tabla o $50 m^3$), está:

- a) a un contenido de humedad de 80% y
- b) a un contenido de humedad de 30% (presecada)

La madera es secada en horno hasta el 8% de CH. Considerar las siguientes dos especies:

- Serebó
- Tajibo

Tabular en forma agrupada los resultados finales y sacar conclusiones.

Soluciones:

- a) Datos.-
 $CH_1 = 80\%$
 $CH_2 = 8\%$
 $Peb \text{ amargo} = 0,36$ (Tabla 6)
 $Peb \text{ tajibo} = 0,85$ (Tabla 6)

$$\text{Amargo } Q_a = \frac{360 \times 50 \times (80 - 8)}{100} \text{ Q}$$

$$Q_a = 12.960 \text{ kg}$$

$$Q_a = 12,96 \text{ ton}$$

$$\text{Tajibo } Q_a = \frac{850 \times 50 \times (80 - 8)}{100} \text{ Q}$$

$$Q_a = 30.600 \text{ kg}$$

$$Q_a = 30,60 \text{ ton}$$

b) Los mismos datos anteriores excepto:

$$CH_1 = 30\%$$

$$\text{Amargo } Q_a = \frac{360 \times 50 \times (30 - 8)}{100} \text{ Q}$$

$$Q_a = 3.960 \text{ kg}$$

$$Q_a = 3,96 \text{ ton}$$

$$\text{Tajibo } Q_a = \frac{850 \times 50 \times (30 - 8)}{100} \text{ Q}$$

$$Q_a = 9.350 \text{ kg}$$

$$Q_a = 9,35 \text{ ton}$$

Resumiendo:

<u>Especie</u>	<u>Peb</u>	<u>CH₁</u>	<u>Q_a ton</u>
Amargo	0,36	80	12,96
Tajibo	0,85	80	30,60
Amargo	0,36	30	3,96
Tajibo	0,85	30	9,35

Conclusiones:

- A un mismo nivel de humedad, una madera más liviana contiene menor cantidad absoluta de agua, respecto a una madera más pesada.
- La madera presecada tiene menor cantidad de agua por extraer respecto a una madera verde o húmeda, sin importar que la especie sea liviana o pesada. Esto podría acelerar el proceso de secado, por ello es recomendable el presecado de la madera antes de secar en horno.

Anexo 6: Principales Factores de Transformación y Conversión de Unidades

1. FACTORES GENERALES

Medidas comunes al sistema internacional(SI)

1 pulgada (1")	=	2,54 cm
1 pie (1')	=	30,48 cm
1 pie tablar (1 pt=1 p ²)	=	0,00236 metros cúbicos de madera aserrada
1000 pies-tabla de madera aserrada	=	2,36 m ³ de madera aserrada
423,7 pies-tabla	=	1 m ³ de madera aserrada
1 libra (1 lb)	=	0,4536 kg
2202,6 libras	=	1 tonelada (1 ton)
1 lb/pulg ²	=	6,895 kPa
1 pulg de mercurio (Hg)	=	3,386 kPa
1 pulg agua	=	249 Pa
1 atmósfera (1 atm)	=	101,325 kPa
1 BTU (British Thermal Unit)	=	1,054 kJ
1 hph	=	2,685 MJ
1 hp	=	746 W
1,34 hp	=	1 kW

2. FACTORES DE CONVERSION DE TEMPERATURA

Si queremos transformar grados centígrados (°C) a grados fahrenheit (°F):

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times 0,555$$

Ejemplo: 115 °F a cuantos °C equivale?.

$$^{\circ}\text{C} = (115 - 32) \times 0,556 = 46,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

A la inversa, si queremos transformar °F a °C:

$$^{\circ}\text{F} = 1,8^{\circ}\text{C} + 32$$

Ejemplo: 75 °C a cuantos °F equivalen?

$$^{\circ}\text{F} = 1,8 \times 75 + 32 = 167 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

3. FACTORES DE CONVERSION DE ENERGIA Y POTENCIA

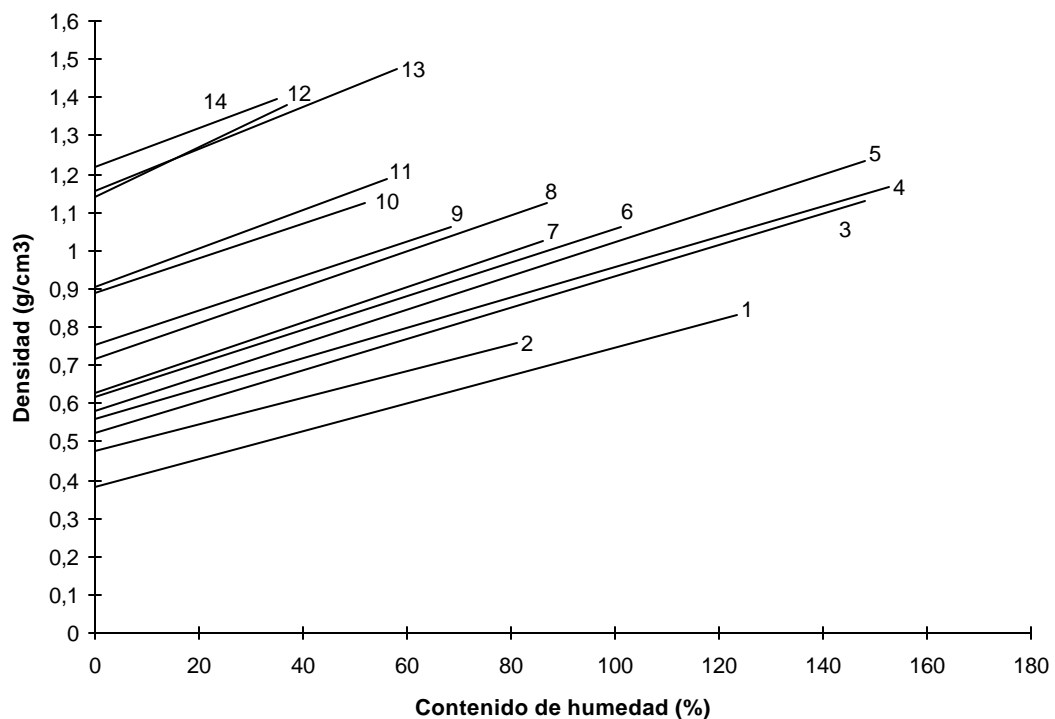
Presión:

1 atmósfera (1 atm)	=	40,68 pulg agua
1 atmósfera (1 atm)	=	0,76 pulg mercurio
1 atmósfera (1atm)	=	14,70 lb/pulg ²
1 atmósfera (1atm)	=	101300 NT/m ²
1 pulgada de agua	=	0,1868 cm mercurio
1 pulgada de agua	=	0,03613 lb/pug ²
1 pulgada de agua	=	249,1 NT/m ²
1 pulgada de mercurio	=	0,1934 lb/pulg ²
1 pulgada de mercurio	=	1333 NT/m ²
1 libra/pulgada ²	=	6895 NT/m ²

Energía, trabajo, calor:

1 Unidad térmica británica = 1 Btu	=	0,0003929 hp-hora
1 Unidad térmica británica = 1 Btu	=	777,9 pie-libra
1 Unidad térmica británica = 1 Btu	=	252 calorías
1 Unidad térmica británica = 1 Btu	=	0,000293 kw-hora
1 caballo de fuerza-hora	=	1 hp-hora = 1980000 pie-libra
1 caballo de fuerza-hora	=	1 hp-hora = 641400 calorías
1 caballo de fuerza-hora	=	1 hp-hora = 0,7457 kw-hora
1 pie-libra	=	1 pie-lb = 0,3239 cal
1 pie-libra	=	1 pie-lb = 37660000 kw-hora
1 caloría	=	1 cal = 0,000163 kw-hora
1 Unidad térmica británica/hora = 1 Btu/hora	=	0,2161 lb-pie/seg
1 Unidad térmica británica/hora = 1 Btu/hora	=	0,0003929 hp
1 Unidad térmica británica/hora = 1 Btu/hora	=	0,07 cal/seg
1 Unidad térmica británica/hora = 1 Btu/hora	=	0,000293 kw
1 libra-pie/seg	=	1 lb-pie/seg = 0,001818 hp
1 libra-pie/seg	=	1 lb-pie/seg = 0,3239 cal/seg
1 libra-pie/seg	=	1 lb-pie/seg = 0,001356 kw
1 caballo de fuerza	=	1 hp = 178,2 cal/seg
1 caballo de fuerza	=	1 hp = 0,7457 kw
1 caloría/segundo	=	1 cal/seg = 0,004186 kw

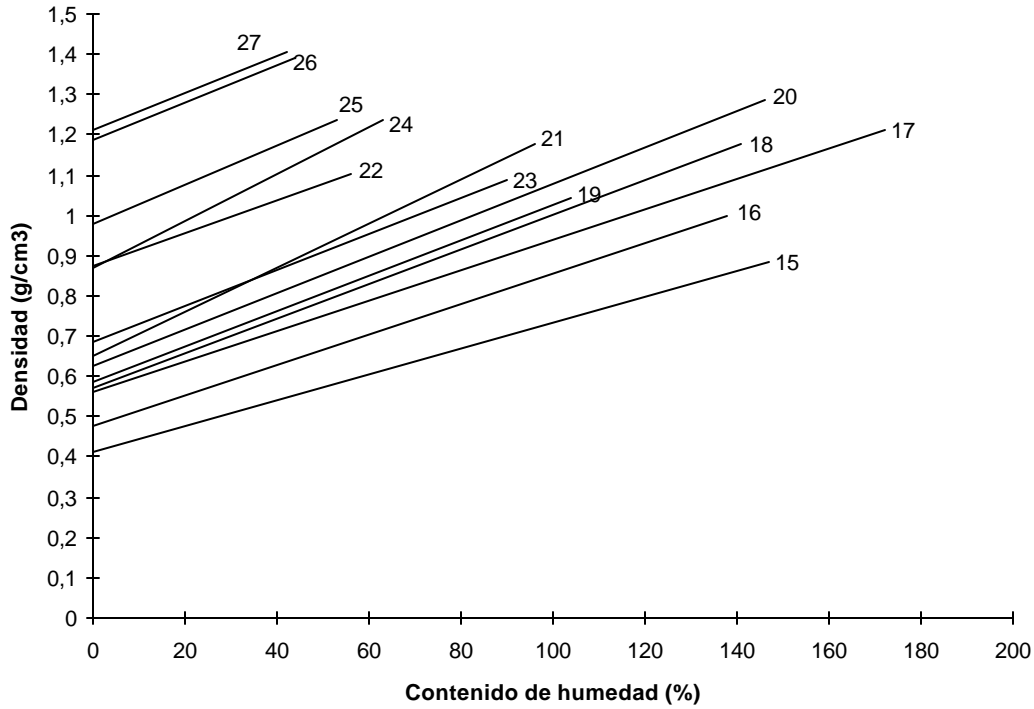
ANEXO 7a. Relación entre la densidad y el contenido de humedad en maderas bolivianas



01.-	$Y = 0.384 + 0.0038x$	$r = 0.80$	Serebó
02.-	$Y = 0.476 + 0.0035x$	$r = 0.83$	Ochoó
03.-	$Y = 0.524 + 0.0041x$	$r = 0.94$	Bibosi
04.-	$Y = 0.557 + 0.0040x$	$r = 0.94$	Plumero
05.-	$Y = 0.582 + 0.0044x$	$r = 0.97$	Ajo
06.-	$Y = 0.617 + 0.0044x$	$r = 0.81$	Palo Maria
07.-	$Y = 0.627 + 0.0046x$	$r = 0.92$	Yesquero Negro
08.-	$Y = 0.715 + 0.0047x$	$r = 0.98$	Coquino
09.-	$Y = 0.755 + 0.0045x$	$r = 0.89$	Verdolago
10.-	$Y = 0.888 + 0.0045x$	$r = 0.87$	Blanquillo
11.-	$Y = 0.903 + 0.0051x$	$r = 0.90$	Almendrillo
12.-	$Y = 1.138 + 0.0067x$	$r = 0.80$	Quebracho Colorado
13.-	$Y = 1.155 + 0.0055x$	$r = 0.65$	Taguaire
14.-	$Y = 1.217 + 0.0051x$	$r = 0.85$	Soto Glabro

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7b. Relación entre la densidad y el contenido de humedad en maderas bolivianas



15.-	$Y = 0.414 + 0.0032x$	$r = 0.91$	Tachore
16.-	$Y = 0.476 + 0.0038x$	$r = 0.87$	Negrillo
17.-	$Y = 0.560 + 0.0038x$	$r = 0.94$	Kaqui
18.-	$Y = 0.573 + 0.0043x$	$r = 0.89$	Mapajo
19.-	$Y = 0.585 + 0.0044x$	$r = 0.86$	Pacay
20.-	$Y = 0.628 + 0.0045x$	$r = 0.95$	Sangre de Toro
21.-	$Y = 0.649 + 0.0055x$	$r = 0.94$	Mururé
22.-	$Y = 0.857 + 0.0048x$	$r = 0.88$	Guayabochi
23.-	$Y = 0.686 + 0.0037x$	$r = 0.97$	Jichituriqui Rosado
24.-	$Y = 0.870 + 0.0058x$	$r = 0.93$	Mora
25.-	$Y = 0.978 + 0.0049x$	$r = 0.71$	Curupaú
26.-	$Y = 1.189 + 0.0046x$	$r = 0.54$	Horco Quebracho
27.-	$Y = 1.211 + 0.0047x$	$r = 0.78$	Soto Piloso

Fuente: Elaboración propia