

**Evaluación de la respuesta al secado de
madera de caoba (*Swietenia macrophylla*
King) en el horno solar de la Unidad de
Forestales de Zamorano**

Rommel Adrian Muñoz Alvarado

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2015

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

**Evaluación de la respuesta al secado de
madera de caoba (*Swietenia macrophylla*
King) en el horno solar de la Unidad de
Forestales de Zamorano**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Rommel Adrian Muñoz Alvarado

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2015

Evaluación de la respuesta al secado de madera de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano

Presentado por:

Rommel Adrian Muñoz Alvarado

Aprobado:

Juan Carlos Flores, PhD.
Asesor Principal

Laura Suazo, PhD.
Directora
Departamento de Ingeniería en
Ambiente y Desarrollo

Juan Carlos Ordoñez, Ing.
Asesor

Raúl Zelaya, PhD.
Decano Académico

Evaluación de la respuesta al secado de madera de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el horno solar de la Unidad de Forestales de Zamorano

Rommel Adrian Muñoz Alvarado

Resumen. La madera procesada tiene dos etapas importantes antes de la fabricación de productos, que son la corta y el secado. La corta minimizar los daños mecánicos y tener estructuras sólidas sin fracturas. El secado de madera consiste en eliminar el exceso de agua de la madera verde para obtener productos de buena calidad. Se realizó una evaluación del horno solar para secado de madera ubicado en la Unidad de Forestales de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. El objetivo de la investigación fue evaluar la respuesta al tratamiento de secado de madera para reducir los daños mecánicos en el horno solar de la Unidad de Forestales. La metodología utilizada consistió la selección y cubicaje de 94.75 pie³ de madera de caoba. Se apiló en el horno solar de la Unidad de Forestales. Se evaluaron daños mecánicos antes y después del tratamiento. Además se evaluó la pérdida de humedad relativa a través del tiempo en horas de radiación solar aprovechables diarias. Se estimó una regresión cuadrática con el programa Minitab 17 Statistical Software con el cual se obtuvo un $R^2=82.6\%$. Se encontró que el horno solar realiza una disminución de humedad relativa constante y mantiene una tasa de extracción adecuada. Se concluyó que la temperatura y velocidad de secado de la madera, además de un correcto apilado, favorece la corrección de curvaturas en los tablones.

Palabras clave: Humedad relativa, medidor de humedad, regresión cuadrática.

Abstract. The processed wood has two important stages before making products, which are cut and drying. The cutting seeks to minimize mechanical damage and have solid structures without fractures. The wood drying consists in remove water excess from the fresh wood to obtain good quality products. An evaluation of the solar oven for wood drying was conducted in the Forest Unit located in Zamorano Pan-American Agricultural School, which main objective was to evaluate the response to treatment of wood drying to reduce mechanical damage to the solar furnace was conducted Unit Forest. The methodology used in the study was the selection and displacement of 94.75 ft³ of mahogany, which was cubed and stacked in the solar oven of the Forestry Unit. Mechanical damage and after treatment were evaluated before the stacked. Besides the loss of relative humidity it was evaluated over time in hours of daily usable sunlight. A quadratic regression in Minitab 17 Statistical Software program which $R^2 = 82.6\%$ was obtained, which is summarized in a decrease of constant relative humidity and an adequate rate of extraction remains was used. A quadratic equation to estimate the range of relative humidity present in the wood was generated. It was concluded that the temperature and rate of dehydration of the timber, and a correct stacking, favors correcting mechanical damages on wood.

Key words enzymatic: Moisture meter, relative humidity, quadratic regression.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
4. CONCLUSIONES.....	14
5. RECOMENDACIONES.....	15
6. LITERATURA CITADA.....	16
7. ANEXOS.....	18

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros Página

- | | |
|--|----|
| 1. Dimensiones de corta evaluados para el lote de madera de caoba. | 6 |
| 2. Características físicas de la madera de caoba tratada, pre y post tratamiento. | 10 |

Figuras Página

- | | |
|---|----|
| 1. Vista frontal del secador solar para madera aserrada de la Unidad de Forestales, Zamorano | 3 |
| 2. Principio general de un secador solar para madera aserrada | 5 |
| 3. Disposición de la madera en el apilado horizontal. | 8 |
| 4. Comparación entre los diferenciales de temperatura interna del horno solar y temperatura ambiental. | 9 |
| 5. Análisis de regresión entre la humedad relativa (HR) y horas sol para madera de caoba. | 10 |
| 6. Diseño propuesto para la construcción de un secador solar para madera en Costa Rica. | 12 |
| 7. Estufa solar de secado de madera propuesta por el gobierno mexicano. | 12 |
| 8. Horno solar para el secado de madera aserrada. | 13 |

Anexos Página

- | | |
|---|----|
| 1. Medidor de humedad relativa de madera, modelo CEM [®] DT-129 de fabricación China. | 18 |
| 2. Formato para toma de datos antes y después del tratamiento. | 19 |
| 3. Formato para toma de datos durante el tratamiento | 20 |

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques contribuyen decisivamente a la mitigación al cambio climático y al suministro de productos y servicios ecosistémicos. Las tendencias actuales sugieren que la actividad y los productos forestales contribuyen de forma decisiva al desarrollo sostenible (FAO 2012). Uno de los principales servicios de los bosques, es el aprovechamiento forestal de la madera para su procesamiento en productos maderables. El comercio de los productos y servicios forestales contribuye con un 2% al PIB mundial y representa el 3% del comercio internacional de mercancías. Se estiman unos 200 mil millones de dólares al movimiento económico maderero a nivel mundial (Confemadera 2015). Los usos y la comercialización de la madera son diversos. Conforme a su nivel de procesamiento, la madera se comercializa en rollo, aserrada, en astillas para tableros o como pasta para procesamiento para papel.

Actualmente la producción y procesamiento de la madera ha aumentado en las regiones de Asia, América Latina y El Caribe. China es el principal productor y consumidor mundial de la madera, por lo tanto su importancia es notable para el comercio. Además, China es el principal importador de madera en rollo industrial, madera aserrada y composición de fibras (FAO 2014). Este movimiento económico motiva a productores y exportadores de madera, a mejorar la eficiencia en el procesamiento de las trozas y mantener sus características, hasta llegar a su destino y puedan resultar en materiales de alta calidad.

Los productores deben mantener los cuidados necesarios de la madera al momento del aprovechamiento para mantener su calidad en la cadena de valor. Dykstra y Henrich (1996) señalan que: “La corta incluye todas las actividades dirigidas a apeaar los árboles en pie y prepararlos para la saca”, por lo que el cuidado en esta etapa garantiza la mayor calidad posible de los productos madereros.

El segundo paso para la obtención de madera para procesamiento, es el secado uniforme de las trozas. Por el secado de la madera se entiende como el proceso de eliminación del agua en exceso del material recién cortado o madera verde, que se aplica con el propósito de optimizar su procesamiento y transporte para varios usos (Viscarra 1998). Toda la madera, de árboles en crecimiento, contiene una considerable cantidad de agua que se la conoce como savia. El peso del agua del árbol vivo (o madera verde) después de que es cosechado puede ser similar al peso de la madera en sí (Medrano 2003). En terminología, el agua presente en la madera o en un producto de madera se expresa como el contenido de humedad. El contenido de humedad se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en la madera, con respecto al peso seco, es decir sin humedad en la madera. El contenido de humedad se representa con la fórmula (Córdoba Foglia 2005):

$$CH = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso seco al horno}} \times 100$$

La madera es un material higroscópico, cuya variación en el contenido de humedad trae cambios en peso, en dimensiones, resistencia y otros aspectos. Estos cambios pueden conducir a deformaciones, la generación de grietas y fracturas, así como el posterior desprendimiento de acabados y uniones (Fuentes-Salinas 2001). Esta agua debe ser removida a cierto grado en el cual se pueda utilizar la madera adecuadamente, a través del proceso de secado (Reeb 1997).

La cantidad de agua en maderas verdes o húmedas varía grandemente dependiendo de la especie. Por lo general se encuentra entre 30% - 200% en cuanto a contenido de humedad (Medrano 2003). Es por esta razón que se considera importante conocer cuál es el contenido de humedad de la madera en su nivel mínimo, cuando ha perdido, toda el agua libre y sólo se queda con agua higroscópica en sus fibras. Este nivel se conoce teóricamente como punto de saturación de la fibra. Este es el punto de inflexión en donde inician las contracciones de las fibras durante el secado, o su hinchamiento durante un proceso de adsorción o humedecimiento (Fuentes – Salinas 2001).

El secado es un paso muy importante dentro del proceso de manufactura de la madera. Debe evitarse una distribución de humedad y temperatura no uniforme en el material que se refleja en muchas ocasiones en la generación de defectos de secado (Martinovic *et al.* 2001). El secado de madera busca acelerar la transferencia de humedad existente en la celulosa, optimizar el consumo energético y obtener un mejor producto. Existen tres métodos de secado de madera, los cuales son (Sandoval – Torres 2009):

- Secado completo al aire libre (secado natural)
- Secado completo en hornos o cámaras
- Secado al aire hasta cerca del punto de saturación de las fibras y complementando con el secado en horno.

El método al aire libre es válido para algunas especies pero hay otras que requieren mayor tiempo para alcanzar la humedad óptima. Además, el secado al aire libre acarrea una serie de problemas como pudrición, hongos, ataque de plagas en la madera; y puede existir la formación de bulbos de humedad, que son focos húmedos en las fibras de la madera. El secado al aire depende de la humedad relativa del ambiente, por lo que muchas veces, no se puede obtener una humedad final similar para todas las especies. El método en hornos o cámaras resulta en un proceso acelerado de secado, con el cual se maximiza la radiación captada dentro de una estructura termoaislante. Existen varias razones que justifican un adecuado secado de madera (Reeb 1997):

- 1) **Mejor usabilidad:** la madera se encoge si pierde humedad y se expande si gana humedad. Por lo tanto se la debe secar al punto mínimo de humedad que tendrá durante su uso.

- 2) **Reduce gastos de transporte:** la madera seca pesa menos (el secado puede reducir el peso a la mitad o incluso mucho más). Más rentable transportar madera, que transportar agua.
- 3) **Menos probabilidad de daños:** manchas, daño mecánico durante el transporte.
- 4) **Reduce susceptibilidad a plagas:** insectos y hongos que atacan la madera.
- 5) **Aumento de fuerza:** al reducir al 30% o menos de humedad relativa, las propiedades de resistencia de la madera aumentan.
- 6) **Mejor agarre o firmeza:** clavos, tornillos y pegamento puede adherirse mejor en madera seca.
- 7) **Un mejor acabado:** las pinturas y acabados se adhieren mejor a madera seca.
- 8) **Mejor aislamiento térmico:** dependiendo del uso final, la madera seca es mejor aislante térmica que la húmeda.
- 9) **Mejor conservación:** los conservantes para madera trabajan mejor en madera seca.
- 10) **Valor agregado:** secar la madera antes de enviarlo brinda un valor agregado ya que es tiempo y trabajo ahorrado para el comprador.

Horno secador solar de madera aserrada. Un secador solar es una cámara que tiene la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La cámara de secado tiene dos partes fundamentales: la primera está sobre la cámara y es la responsable que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de madera que se requiere secar (Salas Garita *et al* 2008).

En el año 2011, se construyó el Secador Solar de Madera para la Edificación Bioclimática en la Unidad de Forestales (Figura 1), gracias al apoyo de la Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica (AEA); en el marco del Proyecto titulado: “Capacitación, Investigación y Promoción sobre Energía Renovable en el Sector Agropecuario y Forestal en la Región Centroamericana”. Esto ayudó a agilizar el proceso de secado ya que la Unidad lo realizaba con el método al aire libre. Con el tiempo, calidad de los materiales y altas temperaturas, el horno empezó a presentar averías que mermaron su funcionamiento hasta provocar su desuso. Esto obligó a la Unidad de Forestales a utilizar nuevamente el método al aire libre.



Figura 1. Vista frontal del secador solar para madera aserrada de la Unidad de Forestales, Zamorano.

El horno solar está elaborado a base de plywood recubierto con pintura negra anticorrosiva. El techo es una lámina de acrílico montado en un armazón de hierro fundido, que forma el espacio para el colector de calor. Para aprovechar la mayor incidencia de los rayos solares, el horno solar está orientado de norte a sur, pues Honduras se ubica en el Hemisferio Norte con respecto a la línea ecuatorial. La caída o inclinación del techo, en el caso de Honduras, debe ser de 14° hacia el sur, de tal forma que se asegure la incidencia de los rayos solares lo más perpendicularmente posible, a lo largo del año. Esta inclinación permite que la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares en las diferentes épocas del año, no afecte la eficiencia en la captación de la energía sobre el techo y el colector de la secadora.

El horno solar tiene un aproximado de 1,235 pies cúbicos de capacidad, con las siguientes dimensiones:

- Vista frontal: largo de 6.70 metros, altura de 1.80 metros.
- Vista lateral: largo de 2.50 metros, altura posterior de 2.45 metros y altura frontal de 1.80 metros.
- Vista posterior: largo de 6.70 metros, altura de 2.45 metros.
- Paredes: grosor de 10 cm.
- Techo: lámina de acrílico de 50 mm de grosor con 15 cm de espaciamiento entre la lámina y el techo del horno, conocido como colector de calor.
- Lámina de acrílico: 22.5 m^2 , dimensión de 7.5 m por 3 m.
- Ventoleras o entradas de aire: el horno cuenta con 11 entradas de aire, 5 en la parte frontal y 6 en la parte posterior. Todas tienen forma rectangular, de 20 cm x 25 cm.
- Salidas de aire: tubos de PVC de 4 pulgadas, instalados en la parte inferior del horno.
- Extractores de aire: 4 ventiladores o extractores de aire colocados en el techo, de 25 cm de diámetro.

Además el sistema eléctrico del horno solar (extractores de aire, bombillas eléctricas), está conectado a un panel solar que vuelve independiente el funcionamiento del horno. El panel solar cuenta con una batería incorporada para almacenar energía. El horno funciona a través del principio de densidad de gases (Figura 2):

1. El aire frío y seco ingresa a través de las ventoleras hacia el colector.
2. Una vez que el aire alcanza altas temperaturas, se succiona mediante los extractores de aire hacia el horno.
3. Por diferencia de densidades, el aire caliente y seco desplaza la humedad de la madera.
4. El aire frío y húmedo desciende y escapa a través de las salidas de aire de PVC.

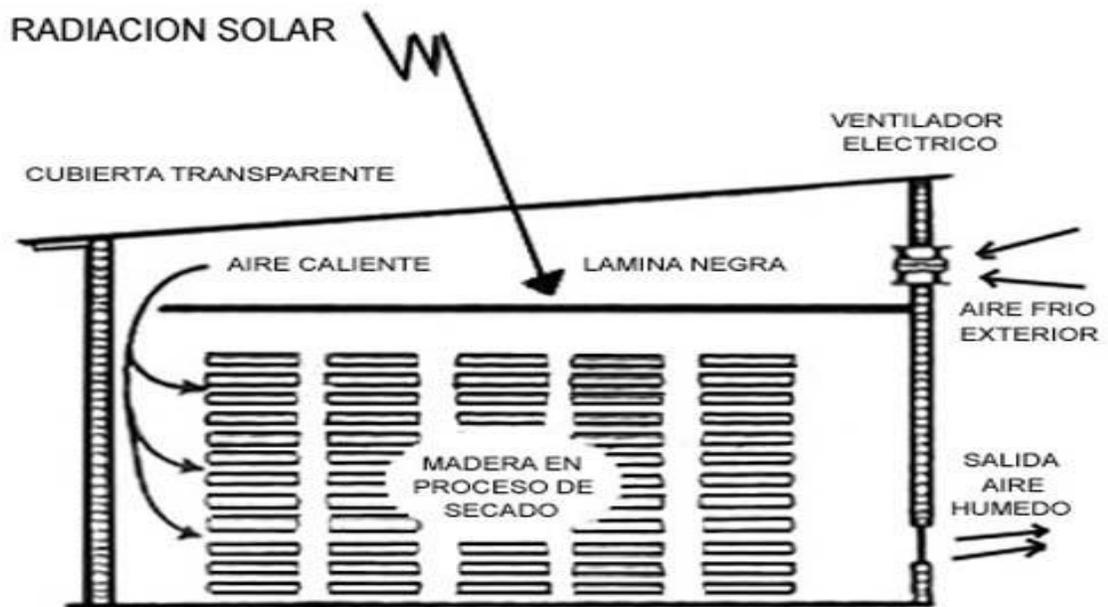


Figura 2. Principio general de un secador solar para madera aserrada
Fuente: Salas *et al* 2008.

Justificación. El aserradero de la Unidad de Forestales trabaja con algunas especies maderables que no se encuentran permanentemente en la unidad. Según su disponibilidad se pueden encontrar: pino, melina, guanacaste, caoba hondureña, caoba africana, teca, bombacoxis o pochote, laurel, eucalipto y el cedro. La Unidad de Forestales plantea ingresar al mercado con nuevos productos maderables, que serán comercializados en Zamorano y ciudades cercanas, como Tegucigalpa; por lo que urge la necesidad de controlar toda la cadena de valor para permitir un adecuado abastecimiento en los puntos de venta a tiempo, con la cantidad requerida y con productos de buena calidad. Para conseguir esta meta, la Unidad de Forestales debe planificar según el tiempo que tomaría cada fase de la cadena de valor. En el caso del secado de la madera, la unidad desconoce el tiempo o temperatura de secado de las especies madereras con las que trabajan. Por esta razón urge la necesidad de plantear un método de cálculo de secado óptimo de madera aserrada.

El objetivo de este estudio es evaluar la respuesta al tratamiento de secado de madera de caoba (*Swietenia macrophylla* King), para reducir los daños mecánicos durante esta etapa en el horno solar de la Unidad de Forestales. Para ello se propuso: i) Evaluar tiempos y temperaturas de secado para la madera de caoba, en el aserradero de la Unidad de Forestales para su posterior procesamiento. ii) Recomendar mejoras en el diseño actual del horno solar para mejorar el proceso de secado de la madera tratada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio. Se evaluó la madera disponible en la Unidad de Forestales de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, ubicada en el km. 30 vía a Danlí al sureste de Tegucigalpa, Honduras.

Selección de madera aserrada para evaluación. Se evaluó madera de caoba que estuvo aproximadamente 3 meses a la intemperie, teniendo una reducción considerable de humedad. La caoba puede alcanzar hasta 40 m de alto y un diámetro de 20 a 150 cm. Posee tronco recto con copa abierta y redondeada. Actualmente es una de las especies más fuertemente explotadas con fines comerciales (ACP 2007). La densidad de la madera de caoba es de 650 kg/m^3 , o bien 41 lb/pie^3 (Engineering ToolBox s.f)

Dimensiones de corta. El aserradero de forestales maneja varias dimensiones de corta dependiendo de las características del árbol aserrado (Cuadro 1). Las dimensiones se marcan en cada uno de los tablones aserrados con 3 números, que representan al grosor, al ancho y largo del tablón. El grosor y el ancho se miden en pulgadas, mientras que el largo se mide en pies. Se evaluaron en total 561 tablones distribuidos en 64 dimensiones de corta.

Cuadro 1. Dimensiones de corta evaluados para el lote de madera de caoba.

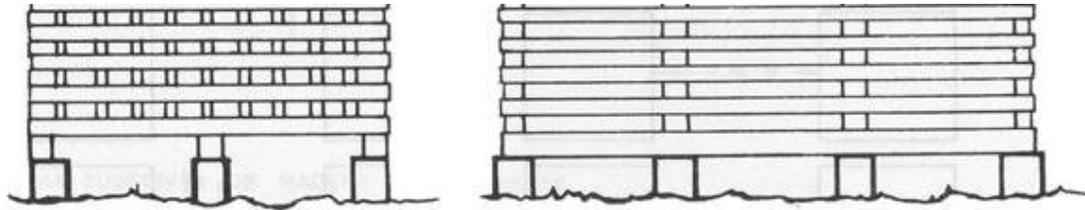
DIMENSIÓN	CANTIDAD	DIMENSIÓN	CANTIDAD
1x4x3	37	1x3x6	13
1x4x6	34	2x6x6	11
1x5x4	34	1x4x5	11
1x5x6	32	2x6x4	9
1x4x4	30	1x6x3	9
1x3x4	29	1x3x1	9
1x3x3	25	1x7x5	7
1x6x6	23	1x6x5	7
1x6x4	23	1x8x6	6
1x4x2	22	1x2x4	6
1x3x2	19	1x8x4	5
1x7x6	17	1x2x3	5
1x5x5	17	1x2x2	5
2x4x6	16	2x4x8	4

DIMENSIÓN	CANTIDAD	DIMENSIÓN	CANTIDAD
1x5x3	16	1x2x6	4
1x5x2	16	2x6x10	3
2x8x6	3	2x4x4	2
2x6x5	3	2x5x3	2
1x8x3	3	2x4x3	2
1x6x2	3	1x3x10	1
1x5x1	3	2x7x7	1
1x4x1	3	3/4x6x6	1
1x6x10	2	1x9x6	1
1x5x10	2	2x7x5	1
2x5x7	2	1x2x5	1
2x7x6	2	1x6x5	1
2x5x6	2	1x3x5	1
2x3x6	2	2x8x4	1
2x4x5	2	1x7x3	1
1x3x5	2	2x4x2	1
1x4x5	2	1x1x2	1
2x5x4	2	1x6x1	1

Se escogieron 30 tablones, al menos uno por cada dimensión de corta. Se numeraron del 1 al 30 para su inspección durante el tiempo de tratamiento y monitorear el efecto del secado en las características físicas y la humedad relativa. Se evaluaron cantidad y tamaño de fracturas y curvaturas presentes, y se dimensionaron los tablones en centímetros.

Pretratamiento. Se cubió el total del lote a evaluar para determinar el efecto del secado en un volumen en específico. En los tablones marcados, se determinó la cantidad de daño existente antes del tratamiento para verificar si el tratamiento puede inferir en la corrección de errores. Los tablones marcados se mezclaron dentro del resto de la madera aserrada para cubrir todos los puntos de calor posibles en el horno.

Llenado del horno solar. Durante el traslado de la madera aserrada, se tuvo el mayor cuidado posible para evitar daños mecánicos en las tablas como fracturas o rupturas, además del apilado horizontal con el que se buscó evitar la formación de curvaturas y torceduras en los tablones y tratar de corregir las ya existentes. En el apilado horizontal (Figura 3) se ubicaron separadores de 1 pulgada de grosor, en la parte inferior de cada piso de madera con el fin de sujetar toda la estructura en la parte superior. Los separadores se colocaron completamente alineados para evitar curvaturas en los tablones por el peso de la madera.



APILADO HORIZONTAL

Figura 3. Disposición de la madera en el apilado horizontal.

Fuente: Guatibonza Amado M. I. 2010.

Tratamiento. Durante cada medición, se registró la temperatura interna del horno en 27 puntos distribuidos uniformemente para obtener un promedio. Para la humedad relativa, se monitoreó cada tablón marcado, obteniendo un promedio para el lote. Se registró el descenso de la humedad relativa hasta alcanzar un porcentaje menor al 10%.

Medición de humedad relativa de la madera y temperatura. La toma de datos se realizó cada 4 horas: 07h00 – 10h00 – 13h00 – 16h00, correspondientes a las horas sol aprovechables, que equivalen a 9 horas diarias y las horas laborales de la unidad de forestales. El equipo usado para la medición de humedad relativa fue un modelo CEM[®] DT-129, que es un instrumento que mide la conductividad según la humedad presente (Anexo 1). El medidor contiene dos electrodos en la parte superior, con los cuales se penetró en la madera y calculan la conductividad directamente en porcentaje de humedad relativa. Se midió en 5 diferentes puntos del tablón para calcular un promedio e identificar posibles bulbos de humedad en la estructura. Además de la humedad, el medidor cuenta con un sensor para temperatura.

Post tratamiento. Se alcanzó el punto mínimo de humedad y se procedió al vaciado del horno. Se realizó el cubicaje post tratamiento del lote evaluado. Se evaluaron las características físicas de los tabloncillos marcados para verificar el efecto del secado, además de la medición de humedad relativa final.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura funcional del horno. Se evaluó el potencial máximo del horno solar de la Unidad de Forestales en sus condiciones actuales. Se encontró que el horno solar presenta una temperatura mínima de 28 °C a las 7 de la mañana, teniendo su temperatura máxima a la 1 de la tarde con 49 °C (Figura 4). Estos valores son promediados ya que se obtuvo un récord mínimo de 25.5 °C y un récord máximo de 51.1 °C. Se puede observar el aumento de temperatura ambiental con el aumento y acumulación de temperatura dentro del horno solar por día a medida de que la radiación solar va aumentando.

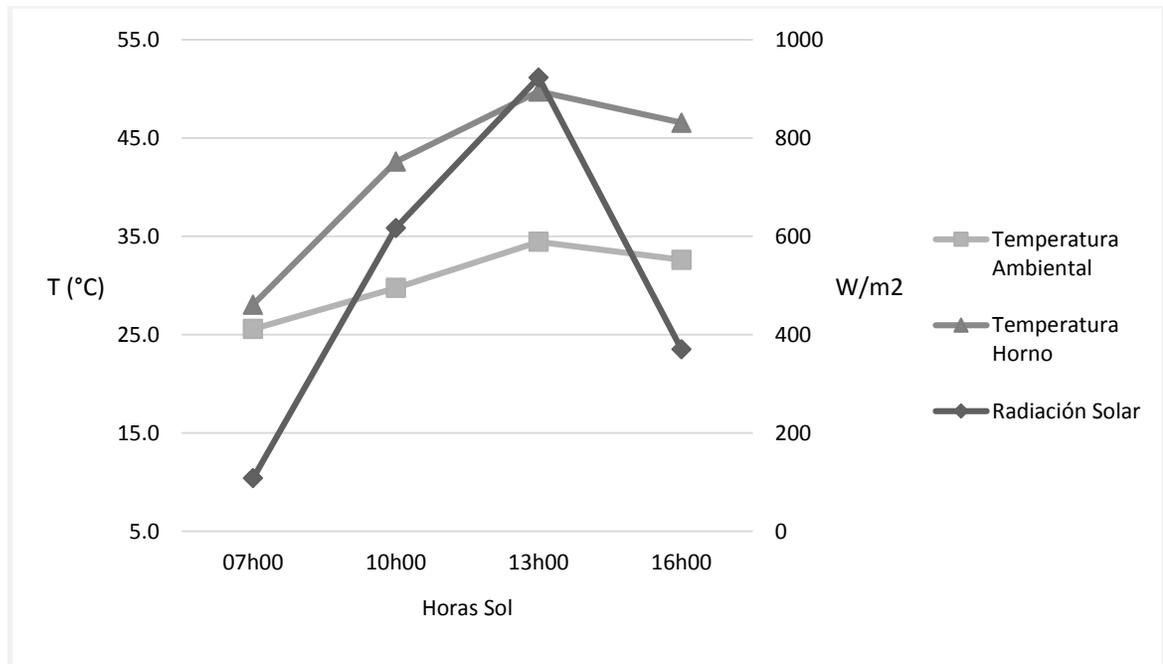


Figura 4. Comparación entre los diferenciales de temperatura interna del horno solar y temperatura ambiental.

Evaluación física de la madera de Caoba. El tratamiento de secado de la caoba se realizó con un volumen inicial de 94.75 pie³. Antes del secado, 5 de los 30 tablones escogidos presentaron curvaturas que se corrigieron luego del tratamiento. Fueron necesarias 45 horas sol, que corresponden a 5 días de secado, para obtener una humedad menor al 10% en la madera tratada. No hubo pérdida de volumen en la madera tratada (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características físicas de la madera de caoba tratada, pre y post tratamiento.

	Pretratamiento	Post Tratamiento	Unidad
Volumen	94.75	94.72	Pie cúbico
Humedad	23.2	8.0	Porcentaje
Curvaturas	5	0	Cantidad
Fracturas	0	0	Cantidad

Capacidad del horno. El volumen sometido a evaluación del lote de caoba fue de 94.75 pie³, que equivale al 7.67% de la capacidad total del horno. Con volúmenes cada vez menores se puede acelerar el proceso de secado por existir un mayor espacio para el intercambio de gases y la remoción de la humedad.

Análisis de regresión. Para determinar el tiempo de secado óptimo para la madera de caoba, se utilizó un análisis de regresión cuadrática con el programa Minitab 17 Statistical Software. Se obtuvo un $R^2=82.7\%$, y un R^2 ajustado=82.6%; que indica una fuerte dependencia entre las variables de humedad relativa y horas sol de secado (Figura 5). La madera de caoba presentó una relación inversamente proporcional en cuanto a la Humedad Relativa contenida en la estructura y las Horas Sol a la que fue expuesta durante el secado. La caoba entró al proceso de secado, en un rango de humedad relativa entre 20.5% a 30%. El tratamiento de secado finalizó en un rango de humedad relativa entre 5.3% y 14.8%.

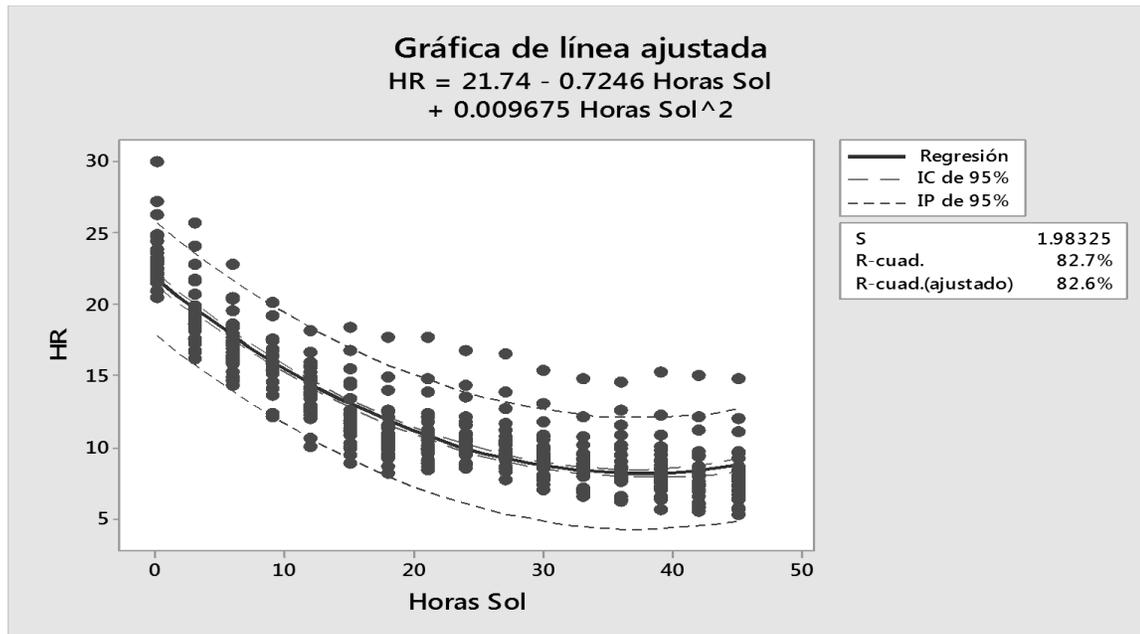


Figura 5. Análisis de regresión entre la humedad relativa (HR) y horas sol para madera de caoba.

Ecuación cuadrática. El software Minitab 17 proporcionó una ecuación, con la cual se puede estimar la humedad relativa presente en la madera a determinado tiempo de exposición en horas sol.

$$HR = 21.74 - 0.7246(Horas Sol) + 0.009675(Horas Sol)^2$$

En donde:

HR= Humedad Relativa predicha.

Horas Sol= Horas de exposición a la radiación solar.

Esta ecuación se basa en un rango de temperatura entre 28.1°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) a 49.8°C ($\pm 3^\circ\text{C}$), que es el potencial de funcionamiento del horno solar en las condiciones actuales. Es importante señalar que esta temperatura se registró en los meses de julio, agosto y septiembre, por lo que puede variar en el transcurso del año.

- **Ejemplo:** Se utilizarán 25 horas sol para estimar la humedad relativa.

$$HR = 21.74 - 0.7246(25) + 0.009675(25)^2$$

$$HR = 9.67\%$$

La madera de caoba a las 25 horas sol, presenta una humedad del 9.67%; el cual es comparado con el rango presente en la tabla, que va de 6.5% a 16% de humedad.

Alternativas de diseño. La unidad de forestales plantea una nueva adecuación en sus labores, planificando la reubicación del sistema de procesamiento de madera. Parte de esa reubicación, es el cambio de lugar del horno solar de secado de madera, por lo que se proponen modificaciones o diseños para su nueva instalación:

Reubicación de los ventiladores. Para una mejor distribución del aire caliente se puede implementar una nueva orientación de los extractores. Actualmente, succionan el aire del colector de calor y se propone que se ubiquen de manera que empujen el aire caliente a través del colector para aprovechar la mayor cantidad de aire caliente (Figura 6).

Reparaciones. Se debe renovar el techo del horno con una lámina de acrílico con protección UV, que pueda resistir la intemperie por un tiempo mayor. Se deben colocar canaletas de desagüe en el techo del horno para evitar que el agua provoque daños en la estructura del plywood. También reconstruir una base para el horno un poco más amplia y con una ligera inclinación que permita el desagüe por las paredes del horno.

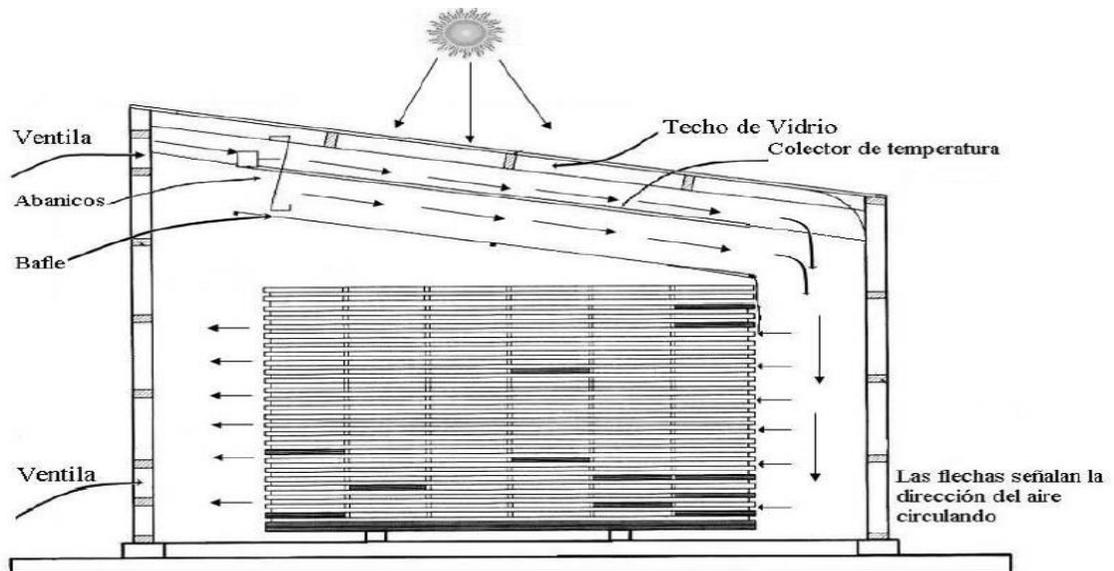


Figura 6. Diseño propuesto para la construcción de un secador solar para madera en Costa Rica.
 Fuente: Salas *et al* 2008.

Ampliación de la puerta de entrada. Una de las dificultades presentadas al momento del apilado de la madera fue la incomodidad al intentar ingresar con madera dentro del horno ya que la puerta es algo pequeña y angosta. La puerta actualmente mide 1.25 m de ancho por 2.10 m de alto y se propone la ampliación hasta de 2 m de ancho para acelerar el proceso de llenado y agilizar medidas de seguridad en caso de accidentes (Figura 7).

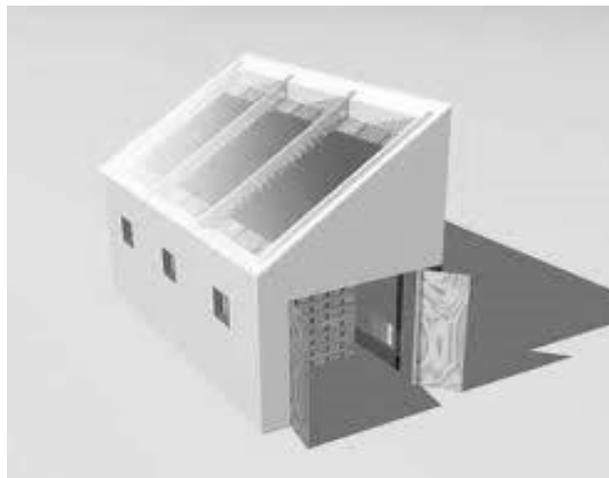


Figura 7. Estufa solar de secado de madera propuesta por el gobierno mexicano.
 Fuente: CONAFOR s.f.

Nuevo diseño de extensión del colector de calor. Se puede aumentar el área de colección de calor que permita un mayor aumento y acumulación de temperatura durante el proceso

de secado de la madera. La distribución del aire caliente se la realiza con dos grandes ventiladores (Figura 8).

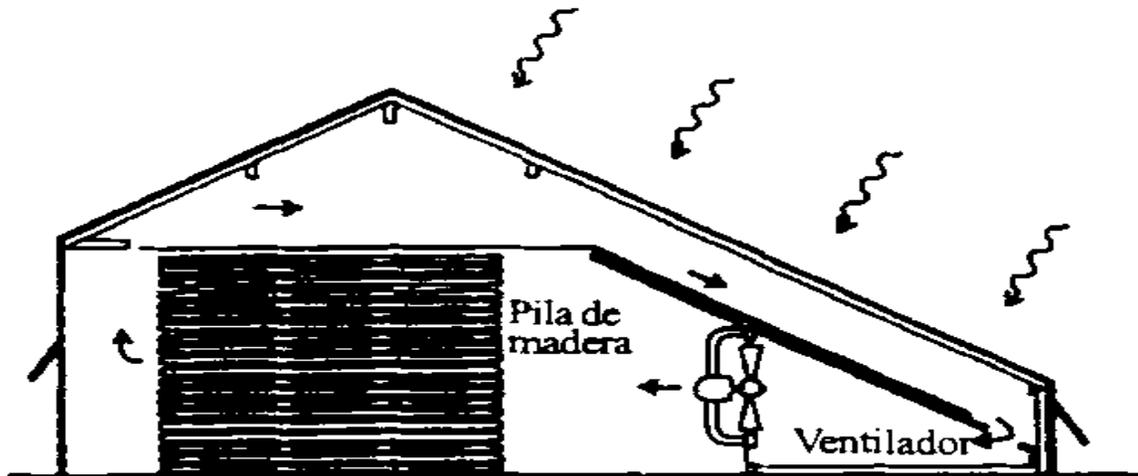


Figura 8. Horno solar para el secado de madera aserrada.
Fuente: Commonwealth Forestry Institute (CFI) e ITDG

Las ventajas que presenta este diseño es un mayor recorrido del aire para que pueda acumular mayor cantidad de calor, manteniendo la misma estructura del actual horno solar de la unidad de forestales. En este modelo, se utiliza una base de pintura negra anticorrosiva en la extensión del colector de calor, para aumentar la transferencia de la radiación solar en aire caliente.

El techo del nuevo colector debe ser de lámina de acrílico traslúcido con protección UV de 50 mm de grosor con 15 cm de espaciado entre la lámina y el techo del horno. Además, la extensión del colector de calor brindará un área de captación de calor de 45 m², con una dimensión de 7.5 m por 6 m y una inclinación de 14°. Se deben mantener las 6 entradas de aire en la parte posterior, de 20 cm x 25 cm y 4 salidas de aire en la parte inferior del horno. Por último, se requieren 2 ventiladores tamaño industrial que se deben colocar a la salida del colector de calor de manera que succionen el aire caliente y lo envíen de frente a la pila de madera en tratamiento. La disposición de ventiladores permitirá tener una mejor homogeneidad de temperatura dentro del horno solar.

4. CONCLUSIONES

- La energía solar representa una alternativa eficiente para el secado de la madera con una tecnología sencilla. Se determinó que el secado de la madera en el horno solar de la Unidad de Forestales es una alternativa para extracción de humedad eficaz y en menor tiempo, manteniendo la calidad en la estructura de la madera de caoba.
- La correcta disposición de los tablonces de madera aserrada favorece la corrección de curvaturas en la madera de caoba. Los defectos generados por la corta o aserrado de estructuras. El correcto espaciamiento entre cada piso de madera favorece la extracción de humedad presente en las fibras de los tablonces, acelerando el proceso de secado.
- El potencial de funcionamiento del horno solar de la unidad de forestales es ideal para el secado de madera de caoba utilizada en el aserradero. Se determinó un tiempo necesario de 45 horas de exposición a radiación solar, que permitió una extracción de humedad relativa constante. Se obtuvo un lote de madera con una humedad del 8%, que es ideal para el procesamiento a productos maderables.
- La temperatura alcanzada por el colector de calor se encuentra en un rango entre 28°C a 50°C en promedio, por lo que se propuso la construcción de una extensión del colector solar para el horno, puesto que se puede aprovechar una mayor radiación para convertirla en calor, durante el proceso de secado de la madera.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar tiempos y temperaturas de secado durante los meses de febrero, marzo, abril y mayo, puesto que el horno solar puede alcanzar mayores temperaturas durante esta época, que es la da mayor incidencia de radiación solar en Honduras. Esto servirá para comparar la eficiencia de la transferencia de calor en varias épocas del año a diferentes temperaturas y en otras condiciones ambientales.
- Investigar la eficiencia del secado de madera entre las variables al aire libre, dentro de cámaras de secado y un secado combinado, para determinar el mejor método de tratamiento para madera aserrada.
- Implementar la ampliación del colector solar y someter a evaluación para determinar si existe una mejor uniformidad en el proceso de secado de madera. Además, evaluar con otras especies maderables puesto que la densidad de las especies pueden influir en la velocidad del secado.
- Realizar un estudio similar utilizando madera lo más verde posible, ya que la madera utilizada para el estudio estuvo por más de 3 meses a la intemperie en forma de troza, lo cual disminuyó considerablemente su contenido de humedad inicial.

6. LITERATURA CITADA

Autoridad del Canal de Panamá (ACP). 2007. Manual de reforestación: especies maderables tradicionales. Cuenca hidrográfica del Canal de Panamá. División de Ambiente. Departamento de Ambiente, Agua y Energía. Ciudad de Panamá. 44 p.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). s.f. Estufa solar de secado de madera. Paquete tecnológico. SEMARNAT. México. 33 p.

Confederación Española de Empresas de la Madera. 2015. Mercado de la madera en el mundo (en línea). Consultado el 29 de septiembre de 2015. Disponible en: <http://www.confemadera.es/jovenes-con-madera/padres/el-mundo-empresarial-de-la-madera/i/760/327/mercado-de-la-madera-en-el-mundo>

Dykstra, D. P. y R. Heinrich. 1996. Código modelo de prácticas de aprovechamiento forestal de la FAO (en línea). Consultado el 29 de septiembre de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/v6530s/v6530s00.htm>

Engineering ToolBox. s.f. Wood Densities. Density of wood as apple, ash, cedar, elm and more (en línea). Consultado el: 3 de noviembre de 2015. Disponible en: http://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html

Kitinoja L. y A. A. Kader. 1995. Small-scale postharvest handling practices. A manual for horticultural crops (en línea). Consultado el 2 de noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/wairdocs/x5403e/x5403e00.htm#Contents>

Fuentes – Salinas, M. 2001. Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6(1): 79-81. División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Chapingo. Nota Científica. México. 3 p.

Gutiérrez Vázquez, B. N., M. Gómez Cárdenas, S. Valencia Manzo, E. H. Cornejo Oviedo. J. A. Prieto Ruiz y M. H. Gutiérrez Vázquez. 2010. Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. del estado de Chiapas, México. Revista Fitotecnia Mexicana. Vol. 33. (Núm. Especial 4). p. 75-78.

Lemos de Moraes, S. A., E. Afonso do Nascimento y D. Carrijo de Melo. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I- estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. Revista Árvore vol. 29 no. 3. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brazil. 11 p.

Martinovic. D., Horman. I., y Demirdzic. I. 2001. Numerical and experimental analysis of a Wood drying process. Wood science and technology. Universidad de Sarajevo. Bosnia y Herzegovina.

Medrano, S. 2003. Humedad en Maderas. Contenido de Humedad en Equilibrio (En línea). Consultado el 29 de octubre de 2015. Disponible en: <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-03-02-EMC.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2012. El estado de los bosques del mundo. Roma, Italia. 64 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2014. Datos y cifras globales de productos forestales. Roma, Italia. 16 p.

P&C Maderas. 2013. Catálogo: Pino Oocarpa (en línea). Consultado el 1 de octubre del 2015. Disponible en: [http://www.pcmaderas.net/SoporteTecnico/PinoOocarpa\(PinusOocarpa\).pdf](http://www.pcmaderas.net/SoporteTecnico/PinoOocarpa(PinusOocarpa).pdf)

Reeb, J. 1997. Drying Wood. Cooperative Extension Service. College of Agriculture. University of Kentucky. United States. 8 p.

Salas Garita C., R. Moya Roque y R. Córdoba Foglia. 2008. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Kurú: Revista Forestal. Tecnología de productos forestales. Informe técnico N°1. Centro de Investigación en Integración Bosque Industria. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 26 p.

Sandoval-Torres, S. 2009. Modelación matemática del secado convencional de madera. Revista Scielo. Madera y Bosques 15(1). p. 75-89.

Viscarra, S. 1998. Guía para el secado de la madera en hornos. Proyecto de manejo forestal sostenible BOLFOR. Chemonics International, USAID. Santa Cruz, Bolivia. 35 p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Medidor de humedad relativa de madera, modelo CEM® DT-129 de fabricación China.



Anexo 2. Formato para toma de datos antes y después del tratamiento.

MADERA DE CAOBA (Muestreo)

#	DIMENSIÓN	Medidas (cm)			Humedad Relativa	Fracturas	Curvaturas
		Largo	Ancho	Grosor			
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
		PROMEDIO					

Anexo 3. Formato para toma de datos durante el tratamiento

MADERA DE CAOBA (Tiempos y Temperaturas)

INICIO _____ Volumen Inicial _____ ft3
 FINAL _____ Volumen Final _____ ft3

DÍA/FECHA	07h00			10h00			13h00			16h00		
	T(°C)	T(°C)	HR									
	Amb	Horn	(%)									
Prom T°C												