

Evaluación de un secador solar tipo invernadero con maderas duras tropicales

Avaliação de um secador solar do tipo estufa com madeiras tropicais duras

Greenhouse-type solar dryer evaluation with tropical hardwoods

DOI: 10.34188/bjaerv8n3-035

Submetido: 30-05-2025

Aprovado: 15-06-2025

Juan Quintanar Olguin

Maestría en Tecnología de productos forestales por la Universidad Austral de Chile
INIFAP – CIRGOC – C. E. San Martinito
Puebla. México
quintanar.juan@inifap.gob.mx

RESUMEN

En el proceso de transformación de productos forestales, el secado de la materia prima es la etapa que mayor tiempo y energía consume. De forma tradicional, esto se realiza exponiendo el producto a los rayos solares de manera directa, donde la calidad final no es la óptima. Una alternativa para mejorar el proceso ha sido el aprovechamiento de la energía solar mediante el uso de secadores solares, donde el uso de este tipo de secadores puede mejorar la productividad y la capacidad de negociación de pequeños productores con baja inversión de capital. La evaluación del proceso de secado se realizó con una mezcla de madera de *Swietenia humillis* (cóbano), *Cordia elaeagnoides* (barcino), *Lysiloma divaricatum* (tepemezquite), *Andira inermis* (manzano), *Enterolobium cyclocarpum* (parota) y *Hura polyandra* (habillo), mediante la obtención de su curva de secado y el contenido de humedad final, que es apropiado para la elaboración de productos de alto valor agregado, con una muy baja inversión en el secador.

Palabras clave: secado madera, eficiencia secado, curva secado.

RESUMO

No processo de transformação de produtos florestais, a secagem da matéria-prima é a etapa que consome mais tempo e energia. Tradicionalmente, isso é feito expondo o produto diretamente aos raios solares, o que não garante uma qualidade final ideal. Uma alternativa para melhorar o processo tem sido o aproveitamento da energia solar por meio do uso de secadores solares, onde o uso desse tipo de secador pode melhorar a produtividade e a capacidade de negociação de pequenos produtores com baixo investimento de capital. A avaliação do processo de secagem foi realizada com uma mistura de madeira de *Swietenia humillis* (cóbano), *Cordia elaeagnoides* (barcino), *Lysiloma divaricatum* (tepemezquite), *Andira inermis* (manzano), *Enterolobium cyclocarpum* (parota) e *Hura polyandra* (habillo), obtendo sua curva de secagem e o teor de umidade final, que é apropriado para a elaboração de produtos de alto valor agregado, com um investimento muito baixo no secador.

Palavras-chave: secagem da madeira, eficiência da secagem, curva de secagem.

ABSTRACT

In the process of transformation of forest products, drying of the raw material stage is the most time and energy consuming. Traditionally, this is done by exposing the product to sunlight directly, where the final quality is not optimal. An alternative to improve the process has been the use of solar energy by using solar dryers, where the use of this type of dryers can improve productivity and the bargaining power of small producers with low capital investment. The evaluation of the drying process was performed with wood *Swietenia humillis* (cóbano), *Cordia elaeagnoides* (barcino), *Lysiloma*

divaricatum (tepemezquite), *Andira inermis* (manzano), *Enterolobium cyclocarpum* (parota) y *Hura polyandra* (habillo), by obtaining the drying curve and the final moisture content which is suitable for the manufacture of high added value, with a very low investment in the dryer.

Keywords: wood drying, drying efficiency, drying curve.

1 INTRODUCCIÓN

El secado de la madera constituye una fase crítica del proceso de industrialización, ya que según el método de secado que se utilice, puede disponerse de ella en mayor o menor tiempo, y ante la necesidad actual de contar con materia prima de calidad y los elevados costos de en infraestructura y energéticos de los secadores convencionales, los productores se han visto con la necesidad de buscar alternativas viables para secar su producto a un bajo costo. Como alternativa se han desarrollado diferentes prototipos de secadores solares para aprovechar la energía proveniente del sol, donde se colecta esa energía y se emplea para secar los productos forestales.

En el transcurso de los últimos 60 años, una gran variedad de secadores solares para el secado de madera ha sido diseñados y evaluados a nivel mundial, tanto en latitudes tropicales como templadas. La mayoría de ellos han sido construidos por Institutos de investigación para su evaluación y solo unos cuantos se han producido para uso comercial. La gran mayoría de los diseños desarrollados están basados en el concepto de “prueba y error”, sólo en años recientes se ha iniciado el modelaje matemático del secado solar de madera (Haque, 2002; Bond y Espinoza, 2016).

La tecnología de los secadores solares basa su funcionamiento en el principio “invernadero”. Los sistemas de captación de la energía solar, se clasifican en dos grandes grupos: aquellos que cuentan con un dispositivo de captación independiente de la cámara de secado y los que utilizan la propia cámara de secado como área de captación de la radiación solar. Entre los sistemas con captación independiente pudieran considerarse diversas tecnologías de captación: colectores planos, canales cilíndricos parabólicos y túneles de polietileno, entre otros (Quintanar, 2016). Sin embargo, la forma y metodología que se pueden aplicar en cada caso específico requiere de un análisis más amplio, por repercutir esto en la calidad del producto, tiempo, factibilidad y costos del proceso entre otros.

El principal objetivo de secar la madera, cualquiera que sea el procedimiento para lograrlo, es remover o eliminar el exceso de humedad que posee y ponerla en condiciones de uso. El tanto por ciento de humedad por remover dependerá de la cantidad de agua que tenga en un principio y del uso al que se destinará.

El secado puede definirse como el proceso de eliminación del exceso de agua que contiene la madera, mediante la aplicación de técnicas apropiadas que minimicen los defectos causados por la pérdida de humedad, en tiempos cortos y costos mínimos.

Secado solar de madera

El sol ha sido utilizado tradicionalmente para realizar el secado de madera al aire libre, pero ante la necesidad de contar con materia prima de calidad, se han desarrollado una variedad de secadores de madera solares adecuándolos a las diferentes condiciones geográficas de cada lugar. Debido a esto y a los elevados costos en infraestructura que son necesarios para un secador de madera convencional, se han desarrollado alternativas de menor costo sin mermar la calidad del proceso. Una de estas tecnologías es el uso del secador solar para el secado de madera, cuyos primeros estudios se iniciaron en 1961 en EE. UU. (Lamrani *et al*, 2023). En México, existen diversas experiencias de secado solar de madera a nivel prototipo, siendo aquella que se realizó a inicios de los años '80s en la Sierra Huichola, con un secador solar de circulación natural del aire y colectores solares externos, el primer reporte del uso secadores solares para madera (Kunze, 1985).

El diseño básico de la tecnología de los secadores solares, consta de cuatro partes fundamentales, y aunque pueden existir variaciones y agregados de equipo según el diseño o grado de sofisticación del mismo, los elementos principales son: cámara de secado, sistema de captación de la energía solar, sistema de circulación del aire y sistema de control de humedad y temperatura (Quintanar, 2005; Quintanar, 2016).

La cámara de secado es la parte donde se apila la madera a secar. Para los materiales de construcción, capacidad o forma geométrica de la cámara (diseño) no existen especificaciones, por lo que es necesario ajustarse a las especificaciones técnicas para estufas de secado de madera, como es el ancho y altura de pilas, entre otras o de los materiales locales que tengan las propiedades adecuadas para ser utilizados en la construcción de la misma (Watkins y Salazar, 2012).

El colector solar puede o no formar parte de la cámara, se construye con materiales transparentes de tal forma que se impida la pérdida de calor del interior, junto con bastidores para soportar el peso del colector. El caso más común es que el colector solar, se ubica como un techo en la cámara de secado, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar.

El movimiento del aire al interior del secador solar debe ser continuo, tanto para que se caliente al pasar por el colector como para que circule a través de las pilas de madera y se realiza mediante el uso de ventiladores, accionados por motores de baja potencia.

Los objetivos fundamentales de la circulación del aire en el secado solar son:

- Transportar el calor de los colectores y así aumentar la velocidad de transmisión del calor.

- Distribuir uniformemente el calor por todo el secador.
- Proporcionar un medio de mezclado y acondicionamiento del aire antes de entrar a la carga de madera o producto a secar.
- Transportar la humedad evaporada de la superficie de las tablas.

Debido a que la humedad y temperatura al interior del secador, dependen fundamentalmente de las condiciones ambientales, su control básico es manual, mediante la apertura y cierre de ventilas.

Con el proceso de secado de madera se busca la eliminación del exceso de agua que contiene, aplicando técnicas que minimicen los defectos causados por la pérdida de humedad, en tiempos cortos y costos mínimos. Una de éstas técnicas es la del proceso de secado solar, que se realiza formando “pilas” de madera al interior del secador. El aire calentado por el colector solar se hace circular a través de las “pilas” mediante los ventiladores, para transportar la humedad evaporada de la superficie expuesta de la madera (Viehbeck, 1999; Quintanar, 2005; Phonetip *et al.*, 2019).

Por tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el proceso de secado de madera aserrada de una mezcla de maderas duras tropicales en un secador solar activo tipo invernadero, mediante la determinación de las condiciones de secado (temperatura y humedad relativa) al interior de la cámara respecto a la temperatura ambiente, así como el comportamiento de la pérdida de humedad de en madera aserrada de maderas duras tropicales.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación del secador se realizó en la localidad de Veladero de los Otates, perteneciente al Municipio de Manzanillo, Col. El diseño del secador bajo estudio es de tipo invernadero, con colectores internos y circulación forzada. Consta de un colector de 30 m² formando parte de la cámara de secado, construido con láminas galvanizadas del calibre más bajo, pintadas de negro “mate” en la parte expuesta al sol, con una orientación hacia el sur y una inclinación igual a la latitud del lugar. La construcción es a base de bastidores de PTR y cubierta con polietileno transparente, calibre 720 con tratamiento para rayos UV, comúnmente utilizado en la construcción de invernaderos (Fig. 1).

Figura 1. Secador solar tipo invernadero.

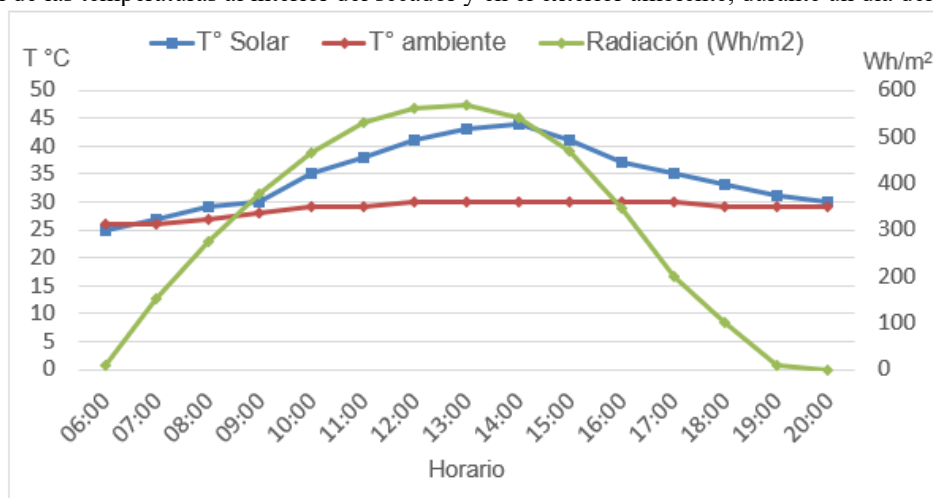


Para mover el aire al interior del secador a una velocidad de 1.5 m/s, se utilizan dos ventiladores eléctricos con motor de ¼ HP. Además, cuenta con ventilas de cierre manual para la extracción del aire húmedo. Las pruebas de secado, se realizaron con una mezcla de madera de las especies: *Swietenia humillis* (cóbano), *Cordia elaeagnoides* (barcino), *Lysiloma divaricatum* (tepemezquite), *Andira inermis* (manzano), *Enterolobium cyclocarpum* (parota) y *Hura polyandra* (habillo), en diferentes cantidades de cada especie. Las tablas fueron apiladas al interior del secador, utilizando separadores de 2.5 cm de grueso. Las pilas de madera aserrada tienen un ancho de 1.2 m, y con una altura de 18 camas de tablas (Quintanar, 2016). La determinación de la pérdida de humedad en la madera durante el proceso de secado se realizó mediante el pesado de tablas muestra como testigos y mediante la determinación del contenido de humedad con un medidor de humedad eléctrico. Se determinó la curva de secado de la madera (pérdida de humedad vs tiempo) hasta alcanzar un contenido de humedad apropiado para elaborar productos a base de madera con alto valor agregado (muebles).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el perfil de la temperatura ambiente y la temperatura al interior del secador solar, así como la distribución de la radiación solar total horizontal, en un día de finales del mes de julio, durante un proceso de secado de una mezcla de maderas duras tropicales. La temperatura media diaria en el secador solar a diferentes horas del día mostró un aumento de 25.2°C a 41°C entre las 6:00 y las 12:00 h, y a 44.1°C entre las 13:00 y las 14:00 h, mientras que descendió a 30.1°C a las 20:00 h. El régimen de temperatura más alto se observó entre las 12:00 y las 14:00 h, que coincide con el periodo de mayor insolación.

Fig. 2. Perfil de las temperaturas al interior del secador y en el exterior ambiente, durante un día del mes de julio.

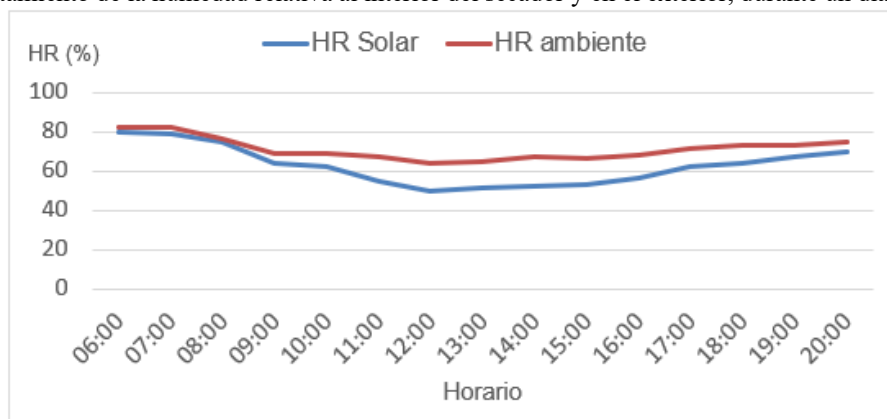


La temperatura media en ambos medios aumentó gradualmente desde la mañana hasta el mediodía y disminuyó al anochecer debido a la alta intensidad solar durante la mañana y la baja en la radiación durante la tarde. La temperatura más alta registrada en el secador solar debió a su capacidad para atrapar y retener el calor solar mediante el efecto invernadero. El resultado obtenido en este estudio concuerda con el informe previo de Owoyemi *et al.* (2017), quienes mencionan la capacidad de los secadores solares para utilizar la energía solar en el proceso de secado.

Al evaluar las condiciones de temperatura al interior del secador y medio ambiente, se encontró que la temperatura máxima de la cámara de secado fue de 44.1 °C, siendo mayor a las existentes en el medio ambiente, con una diferencia de 14°C aproximadamente a las 14 horas. Estos valores son semejantes a los valores reportados por Kanayama *et al.* (2007) y Owoyemi *et al.*, (2017), pero menores a los reportados por Ugwu *et al.* (2015), quienes informan de una temperatura máxima de 61.7 °C al interior de la cámara de secado, obtenida al mediodía.

Como la humedad relativa del aire de secado es un factor crítico para controlar la velocidad de secado del producto, en la Figura 3 se presenta la variación de la humedad del ambiente y la humedad relativa dentro del secador solar, durante la prueba de secado de una mezcla de maderas duras tropicales, correspondiente a un día de finales del mes de julio. Los resultados muestran un contenido de humedad relativa mínima al interior de 50%, mientras la humedad relativa ambiental fue de 64%, valores alcanzados a las 12:00 h, lo que muestra que la humedad relativa ambiental fue mayor que la del secador, comportamiento semejante a lo reportado por Ugwu *et al.* (2015).

Fig. 3. Comportamiento de la humedad relativa al interior del secador y en el exterior, durante un día del mes de julio.



A medida que el aire dentro del secador se enfría durante la noche, la humedad relativa aumenta significativamente. El incremento de humedad en la noche es beneficioso, ya que permite reducir o liberar las tensiones de secado que se desarrollan durante el día. El resultado de secar durante el día y tener humedad creciente en la noche ayuda a minimizar las tensiones (Bond *et al.*, 2011).

Dada la combinación de temperaturas y humedad relativa al interior del secador solar, las condiciones de secado que se generan al interior del secador solar, son consideradas suaves, suficientes para cualquier tipo de madera. Sin embargo, esto no implica que se optimice el uso del secador, más bien, estas condiciones son acordes a las necesidades de secado de aquellas maderas difíciles de secar, como la madera aserrada de algunas especies duras tropicales (Bux *et al.*, 2001), que requieren temperaturas del orden de 38°C a 55-60°C y con humedad relativa alta para su secado apropiado. Por lo tanto, los secadores solares cubren los requerimientos energéticos del proceso de secado de este tipo de maderas. Tampoco el perfil de temperatura es constante durante las horas de un mismo día, y tampoco durante los días que dura el proceso de secado. Por lo tanto, el rendimiento del proceso de secado solar depende de muchos factores, como la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire, el caudal de aire, la configuración geométrica del colector solar, el material de construcción (Khater *et al.*, 2004).

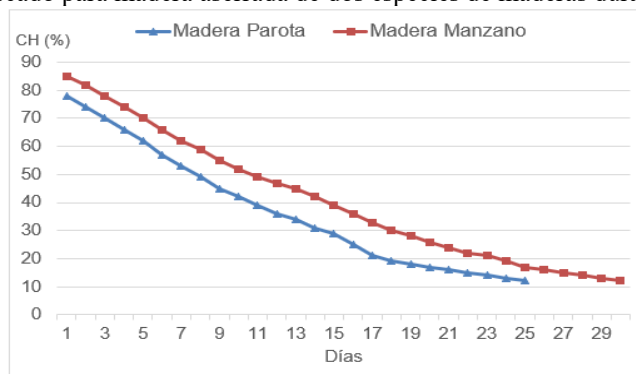
Al analizar la curva de secado (Figura 4), se observa que la pérdida de humedad se produjo de forma casi lineal. El contenido de humedad inicial promedio de la mezcla de maderas duras fue entre 70 y 80 %, con un tiempo de secado de madera aproximado entre 25 y 30 días para alcanzar un 12% de humedad final promedio en la madera, valor menor al contenido de humedad en equilibrio de la zona (13.2 – 15.8 %) y un promedio anual de 14.1 % (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variación del CHE teórico de la madera, en la región de Manzanillo, Col.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ma
13.2	13.2	13.2	13.6	14.0	14.4	14.4	14.8	15.8	14.8	14.6	14.0	14.1

Estos tiempos de secado son menores a los reportados por Solís *et al.* (2003) de 35 días para madera de *Enterolobium cyclocarpum*, utilizando un secador solar. Sin embargo, los resultados muestran que mediante el uso del secador solar se reduce hasta en un 20 - 25% el tiempo de secado, pero obteniendo una calidad de secado superior a la obtenida a través del secado al aire libre, a pesar de que se utiliza la misma fuente de energía (Stangerlin *et al.*, 2009).

Fig. 4. Curva de secado para madera aserrada de dos especies de maderas duras: parota y manzano.



4 CONCLUSIONES

El tiempo promedio para secar madera aserrada de una mezcla de maderas duras tropicales en el área del municipio de Manzanillo, Colima, utilizando un secador solar es de 25- 30 días en promedio, bajando el contenido de humedad de 80% en verde hasta un 12% de humedad en promedio, que es un contenido de humedad apropiado para elabora diversos productos a base de madera con alto valor agregado. El tiempo de secado se reduce entre un 20-25% utilizando un secador solar respecto al tiempo requerido en el proceso al aire libre. Además, se obtiene una mayor calidad de secado, minimizándose los defectos.

REFERENCIAS

- Bond, B. H. and O. Espinoza. 2016. A decade of improved lumber drying technology. *Current Forestry Reports* 2(2):106-118. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0034-z>
- Bond, B.; Espinoza, O. y Araman, P. 2011. Diseño y operación de un secador solar de madera para países tropicales. Informe Técnico General SRS-134. Asheville, NC 28804
- Bux, M.; Bauer, K.; Miihlbauer, W. and Conrad, T. 2001. Solar-assisted drying of timber at industrial scale. *Southern African Forestry Journal* 192(1):73-78. DOI: 10.1080/20702620.2001.10434136
- Haque, M. N. 2002. Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber. Thesis the doctor of philosophy. The University of Sydney. Sydney, Australia. 140 p.
- Kanayama, K.; Baba, H.; Sugawara, T.; Koga, S. and Nakajima, M. 2007. Developing research on an active-passive type solar lumber drying house. In: RENEWABLE ENERGY 2006 Proceedings. Chiba, Japan. DOI: 10.1299/jsmeenv.2007.17.312
- Khater, H. A.; Helwa, N. H.; Enayet, M. M. and Hashish, M. I. 2004. Optimization of solar kiln for drying wood. *Drying technology* 22(4):677-701. DOI: 10.1081/DRT-120034257
- Kunze, G. 1985. Horno solar para secar madera en la sierra Huichola. Huella, Cuaderno de divulgación académica No. 10. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Guadalajara, Jal., México. 9 p.
- Lamrani, B., Bekkioui, N., Simo-Tagne, M. and Ndukwu, M. C. 2023. Recent progress in solar wood drying: An updated review. *Drying Technology* 41(5):605-627. DOI: 10.1080/07373937.2022.2112048
- Owoyemi, J. M.; Sowunmi, O. O. and Aladejana, J. T. 2017. Performance of solar kiln dryer and air-drying shed on *Alstonia boonei* and *Brachystegia eurycoma* wood in Akure, Nigeria. *Journal of Sustainable Technology* 8(2):139-148.
- Phonetip, K.; Brodie, G. I.; Ozarska, B.; Belleville, B. 2019. Drying timber in a solar kiln using an intermittent drying schedule of conventional laboratory kiln. *Drying technology* 37(2):1300-1312. DOI: 10.1080/07373937.2018.1496337.
- Quintanar O. J. 2016. Secado solar: Tecnología apropiada para pequeños productores de maderas duras. Folleto técnico Núm. 88. INIFAP – CIRGOC – C. E. San Martinito. San Martinito, Tlhuapán, Puebla. 32 p.
- Quintanar O. J. 2005. Construcción y operación de un secador solar para madera. Folleto técnico No. 2. Campo Experimental San Martinito, CIRCE-INIFAP. San Martinito, Puebla. Méx. 45 p.
- Solís, R. L. E.; Cerón, C. M. A. y González, A. I. 2003. Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. *Ingeniería* 7(3):35-48.
- Stangerlin, D. M., Santini, E. J., Susin, F., Melo, R. R., Gatto, D. A. and Haselein, C. R. 2009. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. *Ciência Florestal* 19(4):461-472.

Ugwu, S. N., Ugwuishiwu, B. O., Ekechukwu, O. V., Njoku, H. and Ani, A. O. 2015. Design, construction, and evaluation of a mixed mode solar kiln with black-painted pebble bed for timber seasoning in a tropical setting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:1404-1412. Doi: 10.1016/j.rser.2014.09.033

Viehbeck, P. 1999. Lo básico del secado de madera con energía solar. GATE-GTZ. Eschborn. Traducido por Ormaza, E. y A.M. Galindo. Santa Cruz, Bolivia. 49 p.

Watkins, M. y Salazar, G. 2012. Diseño, construcción y ensayo de un secadero solar para madera. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16:9-15.