

CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UN SECADOR SOLAR PARA MADERA ASERRADA

M. Fuentes-Salinas; D. Luna-Sánchez; J. Osorio-Suárez; J. Corona-Islas

División de Ciencias Forestales; Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5, Carretera México – Texcoco, Texcoco, Estado de México
Correo-e: mariofusa@yahoo.com.mx

RESUMEN

Este trabajo consistió en construir y probar un secador solar para 7.075 m³ de madera aserrada, destinado a los pequeños y medianos productores forestales. Para la construcción se utilizaron materiales disponibles en cualquier región de México y para evaluar su funcionamiento se usó madera de *Pinus hartwegii* de 2.54 cm de espesor, 2.50 m de largo y anchos variables. La cámara está construida tipo invernadero, con un piso de concreto, estructura metálica para soportar el colector solar, muros a base de bastidores de madera y forro de plástico, y está equipado con dos ventiladores axiales con motor de ½ HP. Para la validación se hicieron dos ensayos de secado, uno en el secador solar y otro secado al aire libre, teniendo como resultado que la madera en el secador solar se secó en el 50 % del tiempo requerido para el secado al aire libre, a un contenido de humedad final del 10 y 12 % respectivamente; además, que la calidad de la madera resultó también mejor en el secador solar. El costo de construcción del secador solar fue de \$ 5,227. 25 US Dls. y se estimó un tiempo de construcción de 21 días.

PALABRAS CLAVE: secado de madera, contenido de humedad, madera de pino.

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A SOLAR DRYER FOR LUMBER

SUMMARY

A 7.075 m³ solar dryer for small and medium lumber producers was constructed and tested. Materials readily available in any region of Mexico were used to construct the dryer. *Pinus hartwegii* boards 2.5 cm thick x 2.50 m long, with varying widths, were used. The chamber is a greenhouse-type with a concrete floor and a metallic structure to support the construction and collect solar heat. Walls are made of wooden frames and plastic covering. The dryer is equipped with two axial ventilators with a ½ HP motor. For validation of the dryer, two tests were run, one in the solar dryer and the other air-dried. The wood from the solar dryer required an average of 50 % of the time required to air-dry to final moisture contents of 12 and 10%. Wood quality was also better in the solar dryer. Cost of construction of the dryer was US \$ 5,227.25 and construction time was estimated at 21 days.

KEY WORDS: lumber drying, wood moisture content, pine wood.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace referencia al proceso constructivo, funcionamiento y eficiencia de un secador de madera aserrada, tipo invernadero, aprovechando la energía solar a través de un colector solar para secar la madera. Surge de la necesidad de contar con un sistema alternativo de secado, diferente al secado al aire libre, para reducir tiempos de secado y lograr contenidos de humedad más bajos, pero sin que represente una elevada inversión como la que caracteriza a los secadores convencionales comerciales.

En México se seca poco volumen de madera por métodos artificiales o estufas convencionales debido principalmente a los altos costos de inversión (López, 1985), lo cual limita que muchos empresarios no tengan la capacidad para secar artificialmente su madera; considerando lo anterior, una alternativa es la construcción y utilización de secadores solares, dado que su material de construcción puede ser más barato, además, al aprovechar mejor la energía radiante del sol se está en la posibilidad de reducir significativamente los tiempos de secado y contenidos de humedad finales (Fuentes, 1996).

Los secadores solares están integrados en forma general por una cámara, un colector de energía solar, ventiladores, ventilas y desviadores de aire. Su principio de funcionamiento inicia cuando los rayos solares inciden en el colector solar, el cual convierte la energía de radiación en energía térmica al calentar el aire dentro del colector. El flujo de aire se produce por ventiladores internos que transportan el aire caliente hasta la madera, la humedad existente en la misma pasa al aire, tendiendo a elevar la humedad relativa después de cierto tiempo, este aire húmedo se remueve total o parcialmente por medio de ventilas, logrando secar así la madera. Bajo este planteamiento, el objetivo principal del proyecto fue la construcción y validación de un secador solar con capacidad para 3,000 pies tabla de madera aserrada, (Figura 1), evaluando su funcionamiento a nivel comparativo con el secado al aire libre en lo que se refiere a tiempos de secado y calidad de la madera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Construcción del secador solar

Para la construcción del secador, se elaboró inicialmente una serie de 10 planos, los cuales se generaron como resultado de un análisis de las características, especificaciones, materiales y resultados obtenidos de 15 proyectos de secadores experimentales desarrollados tanto en México como en el extranjero, (Maldonado y Peck, 1962; Troxel y Mueller, 1968; Bois, 1977; Solano, 1979; Yang, 1980; Martínez, 1984; Simpson y Tschernitz, 1988; Rodríguez *et al.*, 1989; Álvarez y Fernández, 1990 y Viehbeck, 1999), pero de los cuales en su mayoría no se aporta información sobre sus aspectos constructivos, que es parte de la información que los productores de madera aserrada requieren. Se evaluaron las diferentes variables básicas como: capacidad de los secadores; relación metros cuadrados de colector por metro cúbico de madera; número y tamaño de los ventiladores; distancia entre colector solar y transmisor selectivo, entre otras variables.

Así, se generaron tablas de datos para determinar los valores medios o los aspectos más comunes entre los diferentes diseños, para generar el diseño del secador con fines no experimentales, sino ya de una capacidad adecuada para su operación por pequeños productores, determinándose una capacidad de 3,000 pies tabla, equivalente a 7.075 m³a.

El secador se construyó e instaló en la Universidad Autónoma Chapingo, a 40 km al este de la ciudad de México, consta de una estructura metálica a base de postes y largueros metálicos clasificados en el comercio como PTR, un colector solar en lámina negra calibre 14, una serie de bastidores de madera cubiertos con malla de alambre y plástico para invernadero. Cuenta con un par de

ventiladores axiales de 60 cm de diámetro con motor de ½ HP que se encargan de la circulación interna del aire y dos pares de ventilas para el intercambio del mismo (Figura 1).

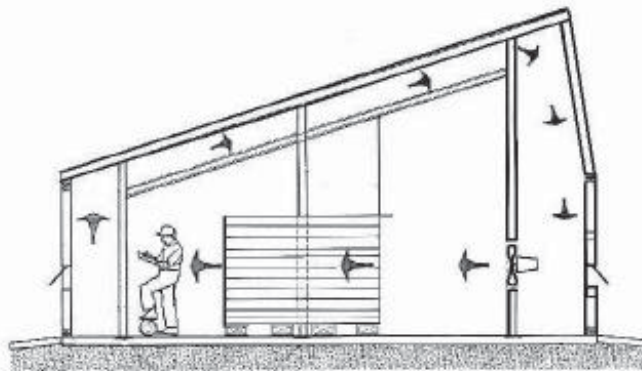


Figura 1. Diagrama simplificado de circulación del aire y perfil del secador solar.

Para el proceso constructivo se realizó un firme de concreto de 6.00 x 5.50 m, el cual se coló junto con una serie de anclas para la fijación tanto del colector solar como de los bastidores de recubrimiento; el colector solar se soportó en siete postes metálicos de 5 x 10 cm conocidos como PTR, constando dicho colector de lámina pintada de negro mate. La altura del secador en su pared norte es de 3.70 m y en la pared sur es de 2.16 m, con una pendiente de 19° hacia el sur. Una vez instalado el colector solar, se procedió a montar los ventiladores junto con el equipo de encendido y apagado y el tendido eléctrico, además de bastidores de contrachapado para el control del flujo del aire.

Posteriormente, se elaboraron y colocaron los bastidores de madera (en piezas de 2.5 x 7.5 cm) para formar los muros de los cuatro costados de la cámara; dichos bastidores se instalaron con los anclajes previamente fijados al firme de concreto y unidos mediante tornillos. Finalmente se cubrieron los bastidores con malla de alambre para a su vez soportar el plástico de recubrimiento. El secador presenta una puerta de carga y descarga y dos puertas de inspección, así como ventilas en los muros norte y sur para el intercambio de aire (Figuras 2 y 3).

Para la validación del secador solar se compararon tiempos y calidad de secado en madera apilada al aire libre y dentro de la cámara del secador; para esto se establecieron dos pilas de madera en el secador solar y dos pilas al aire libre, en cada pila de madera se incluyeron sus respectivas muestras de secado (4 por pila). Dichas muestras fueron pesadas diariamente con el fin de registrar los contenidos de humedad diarios. Esta evaluación se siguió hasta el tiempo requerido para alcanzar un contenido de humedad final del 10 %.



Figura 2. Secador solar en proceso de construcción.



Figura 3. Secador solar terminado y en funcionamiento.

Validación del secador solar

Las pilas de madera se construyeron el mismo día en ambos sistemas, con madera de *Pinus hartwegii* de 2.5 cm de espesor, teniendo un contenido de humedad inicial promedio de 118 % la madera a secar al aire libre y de 125 % la madera a secar en el secador solar. De igual forma se anotaron las condiciones climáticas prevalecientes, tanto en el interior del secador solar como en el exterior; se construyeron gráficas de temperatura y humedad relativa para observar las diferencias en ambos sitios.

Para la evaluación de la calidad del secado de la madera, se utilizó la Norma Chilena de Clasificación "NCh. 178.Of.79. Madera de *Pino insigne*. Clasificación por Aspecto" (INN, 1979), debido a que cumplía con los requisitos necesarios para determinar las condiciones y niveles de los posibles defectos de secado. Esta norma establece rangos de valores permisibles para cada tipo de defecto, considerando además las dimensiones de la pieza. Junto con la norma, la calidad del secado resultante se

evaluó siguiendo el criterio de clasificación establecido por Kauman y Mittak (1966) y aplicado para un estudio similar también por Fuentes (1994). La calidad de secado se determinó en una muestra de 100 tablas para cada uno de los procesos de secado, colocándose 50 tablas en cada una de las dos pilas (repetición) por proceso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo y costo de la construcción

Para la construcción se siguió el diagrama de ruta crítica de la Figura 4, con el fin de optimizar los tiempos de construcción del secador. Como puede verse en la Figura 4 y Cuadro 1, la construcción requiere aproximadamente de 21 días trabajando jornadas de 8 horas y contando con el personal adecuado para cada labor (1 albañil, 1 herrero, 1 electricista y 1 carpintero).

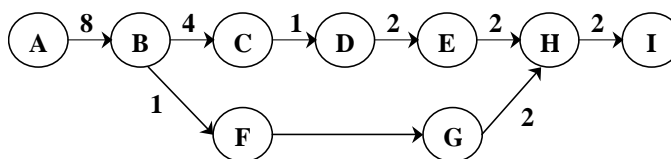


Figura 4. Diagrama de ruta crítica para la construcción del secador solar.

Cada letra del diagrama de la Figura 4, corresponde a una etapa y sección constructiva del secador, mismas que se indican en el Cuadro 1. El secador tuvo un costo de \$ 5,227. 25 US Dls., considerando los precios de los accesorios en el comercio local de la ciudad de México y las tarifas de la mano de obra en la misma localidad en el año 2002 que se indican en el Cuadro 2.

CUADRO 1. Secuencia de la construcción del secador solar, según la ruta crítica

Actividad	Actividad Precedente	Duración (días)
A. Cimentación y losa de piso		8 (fraguado)
B. Estructura del colector solar	A	4
C. Colocación de ventiladores	B	1
D. Instalación eléctrica	C	2
E. Cubierta de la pared de ventiladores	D	2
F. Construcción y colocación de la estructura de madera	E	5
G. Colocación de la malla de alambre	F	2
H. Construcción y colocación de puertas y ventilas	F	2
I. Recubrimiento de plástico	G	2
TOTAL		21 (días efectivos)

CUADRO 2. Resumen de costos de la construcción del secador solar para madera aserrada (En US Dls.).

Concepto	Costo \$ (US Dls.)
1. Materiales:	
a. Cimentación y anclaje	476.00
b. Estructura metálica (colector solar)	574.55
c. Material eléctrico y ventiladores	1,567.45
d. Madera (cimbra, estructura y recubrimiento)	525.85
e. Recubrimiento	354.00
f. Accesorios	52.60
Subtotal	\$ 3,550.45
2. Maño de obra	
a. Trazo, limpieza de terreno y zanja	136.35
b. Construcción de la cimentación	681.80
c. Construcción de la estructura metálica	272.70
d. Construcción de la estructura de madera	295.00
e. Recubrimiento de plástico	136.40
f. Instalación eléctrica	154.55
Subtotal	\$ 1,676.80
Costo Total del Secador	\$ 5,227.25

Condiciones Comparativas de Temperatura y Humedad Relativa.

Antes de introducir las cargas de madera al secador solar para evaluar su funcionamiento, se registraron durante una semana a diferentes horas del día los niveles de temperatura y de humedad relativa del aire, tanto en el exterior como en el interior del secador, para conocer precisamente sus magnitudes y las condiciones bajo las cuales estaría expuesta la madera. Mientras que al aire libre se alcanzó una temperatura promedio máxima de 24 °C, en el interior del secador se alcanzaron los 49 °C, ambas a las 15:00 h, lo que representó un nivel de 26 °C superior a la ambiental, es decir; el doble, como se ilustra en la Figura 5.

En lo que se refiere a la humedad relativa, para el mismo periodo y condiciones interiores y exteriores del secador, se registraron valores de humedad relativa superiores al aire libre, en relación con las condiciones en el interior del secador, como se ilustra en la Figura 6.

Ya una vez introducida la madera al secador solar y apilada la madera para el secado al aire libre, se volvieron a medir dichos factores de temperatura, humedad relativa y se estimó el consecuente índice higroscópico o contenido de humedad de equilibrio que corresponde a la madera expuesta a tales condiciones; los valores promedio que prevalecieron durante el secado se indican en el Cuadro 3.

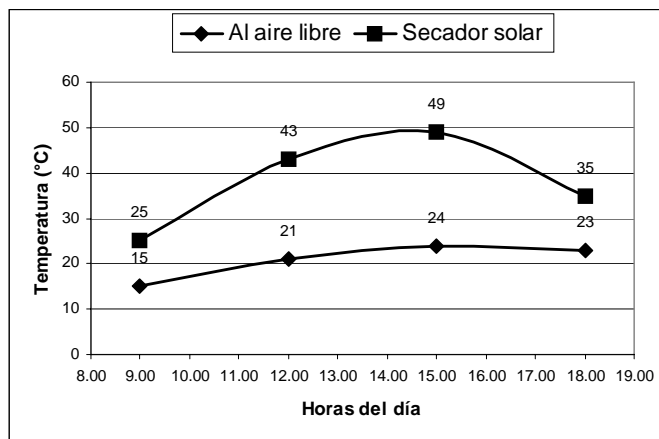


Figura 5. Variación promedio de la temperatura en el transcurso del día al aire libre y en el secador solar (24 al 30 de mayo del 2002).

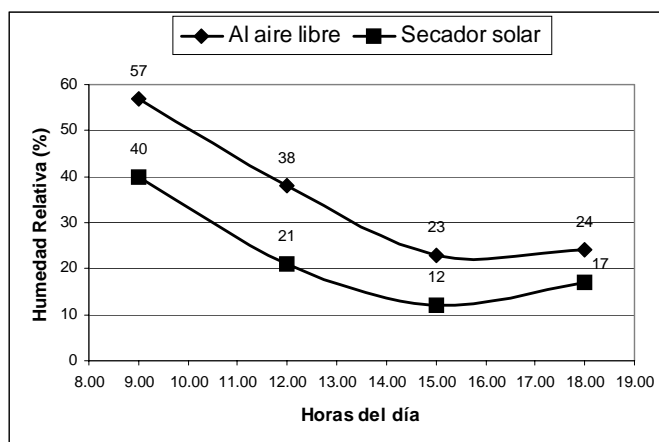


Figura 6. Niveles de Humedad relativa del aire promedio diaria en el exterior e interior del secador solar, sin carga.

CUADRO 3. Condiciones medias de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio durante el secado de la madera

Secado	Temperatura °C	Temperatura °F	Humedad relativa (%)	Contenido de humedad de equilibrio
Solar	32.4	90.5	28.1	5.6
Al aire libre	24.1	75.5	35.2	6.9
Diferencia	8.3	15.0	7.1	1.3

Como los niveles de temperatura y humedad relativa del aire son los dos principales factores ambientales que influyen en el tiempo de secado, se deduce que las condiciones ambientales que se generan en el interior del secador solar son más favorables para lograr un secado de la madera en menor tiempo y también adecuadas para

alcanzar un contenido de humedad final menor del que es posible lograr en el secado al aire libre para el mismo lugar y época del año.

Cabe indicar que la humedad relativa del aire en el interior del secador ya con la madera a secar, se elevó al principio del proceso de secado por efecto de la misma humedad evaporada de la madera hasta niveles del 75 %; con base en este parámetro, abrieron y cerraron las ventilas del secador para intercambiar el aire húmedo del interior por aire seco del exterior, pretendiendo bajar la humedad relativa hasta un nivel máximo del 40 % (los valores del Cuadro 3 son promedios); para ello, fue necesario dejar abiertas las ventilas durante los primeros tres días, hasta que se alcanzó el 30 % de contenido de humedad en la madera, posteriormente se mantuvieron cerradas por períodos de dos horas durante el día, y abiertas durante media hora para desalojar el aire húmedo hasta terminar el secado. Por las noches se dejaron abiertas puertas y ventilas.

Tiempos de secado

El secado de la madera de *Pinus hartwegii* de 2.5 cm de espesor para la condición al aire libre y en el secador solar se inició el día primero de junio y se dio por terminado el día 17 del mismo mes. Se inició el secado de la madera expuesta al aire libre con un contenido de humedad inicial (CHi) de 118 % y se dio por terminado a un 10 % de contenido de humedad final (CHf) después de 17 días.

En el caso del secado solar, Figura 7, el proceso se inició a un contenido de humedad (Chi) de 125 % y se dio por terminado a un 10 % de contenido de humedad final (CHf) promedio, el cual se logró en sólo ocho días. Lo anterior significa que, habiéndose programado el secado para un contenido de humedad final del 10 %, en el secador solar este valor se alcanzó en ocho días, mientras que en el secado al aire libre, en ese tiempo todavía presentaba un 20 % de CH; después de 17 días de secado la madera se estabilizó al 12 % y no fue posible bajar el CH al 10 % estipulado (Figura 8).

La relación de tiempos de secado en el secador solar y secado al aire libre se ubicó en la moda de las relaciones reportadas en los trabajos experimentales publicados por Maldonado y Peck (1962); Troxel y Mueller (1968); Bois (1977); Solano (1979); Yang (1980); Martínez (1984); Simpson y Tschernitz (1988); Rodríguez *et al.* (1989); Álvarez y Fernández (1990) y Viehbeck (1999), que es en promedio una diferencia del 50 %. Lo anterior puede ser resultado de las diferencias en los niveles de los factores secantes, temperatura y humedad relativa del aire, los cuales fueron más favorables para el secado en el interior del secador solar como se ilustra en las Figuras 5 y 6. Aunado a lo anterior, hay que considerar que en el secador

la velocidad del aire generada por los ventiladores fue de 3.8 m/s constante, mientras que al aire libre esa velocidad fue inferior e incluso nula en varios momentos.



Figura 7. Secador solar con la carga de madera en proceso de secado.

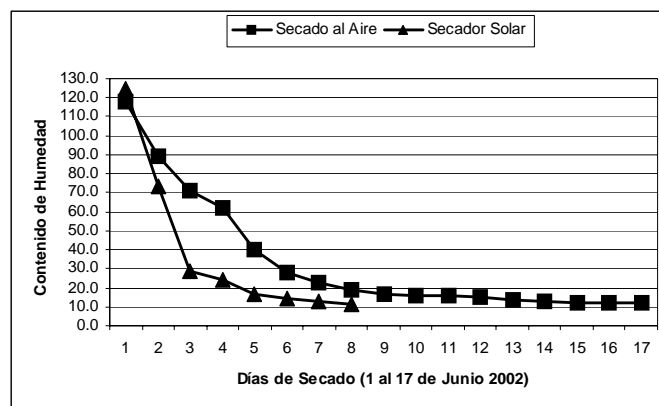


Figura 8. Curvas de secado al aire libre y en el secador solar, de la madera de *Pinus hartwegii* de 2.54 cm de espesor.

Calidad de la madera secada

De acuerdo a los criterios de clasificación de la calidad de secado de Kauman y Mittak (1966) y Fuentes (1994), la madera secada al aire libre, según la cantidad e intensidad de grietas, rajaduras y deformaciones manifestadas se clasificó y se ubicó en el rango de 2.01 a 3.00, en el cual se considera que el proceso de secado fue defectuoso o que las condiciones de secado fueron "inadecuadas". Sin embargo, la madera secada en el secador solar generó un índice de calidad que se ubicó en el rango de 1.01 a 1.50 el cual corresponde a un tratamiento de secado satisfactorio, aunque las condiciones de secado se consideran "poco adecuadas". No obstante, se obtuvo una mejor calidad de secado en el secado solar, en comparación con el secado al aire libre, aunque cabe mencionar que en ambos

sistemas el endurecimiento superficial se manifestó ligeramente y de manera similar.

Las diferencias en la calidad de la madera secada en ambos sistemas puede atribuirse a que la madera secada al aire libre queda expuesta, durante el proceso, a la incidencia directa de la radiación solar, al menos en los extremos y tablas ubicadas en las orillas de las pilas, lo que puede conducir a un secado acelerado de la superficie y puntas de las tablas con la consecuente formación de grietas y rajaduras, situación que no sucede en la madera del interior del secador, la cual no se expone a dicha radiación directa ni a las variaciones de humedad superficial por efecto de las lluvias.

Dados los resultados anteriores, se tuvo el interés por parte de productores forestales de los estados de Michoacán, Tlaxcala y México, entidades donde ya se han construido y puesto en operación estos secadores con resultados favorables para dichos productores, al grado que, como en el municipio de Villa del Carbón, Estado de México, ya construyeron un segundo secador y ellos mismos hacen difusión entre los productores ejidales y comunales de otras zonas forestales como se ilustra en la Figura 9.



Figura 9. Secadores solares ya instalados productivamente en Villa del Carbón, Estado de México. Demostración operativa a productores forestales.

CONCLUSIONES

1. La construcción del secador solar diseñado es sencilla y no requiere de equipos o accesorios sofisticados para su funcionamiento.

2. Se lograron en el secador solar temperaturas de hasta 49 °C que fue el doble de la máxima manifestada al aire libre.

3. En el funcionamiento y eficiencia del secador solar, es fundamental el programa de apertura y cierre de las

ventilas, debiéndose dejar abiertas permanente las ventilas de salida hasta que la humedad baje al 30 %.

4. En el secador solar, se logró un secado satisfactorio y en un tiempo equivalente a la mitad del requerido para el secado al aire libre, aunque en la clasificación se consideran condiciones de secado poco adecuadas, este sistema produjo madera seca de mejor calidad en general, que la madera secada al aire libre.

LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ N., H.; FERNÁNDEZ, J. L. 1990. Solar drying of saw lumber in Spain. Forest Industries Department, National Agricultural Research Institute, Madrid. 173-174 pp.
- BOIS P., J. 1977. Construction and operating a small solar-heated lumber dryer. Forest Product Utilization, Technical Report N° 7. USDA, FS, Madison. 12 p.
- FUENTES S., M. 1994. Secado de la madera aserrada de *Pinus radiata* D. Don. impregnada con sales hidrosolubles CCA. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 162 p.
- FUENTES L., M. E. 1996. Análisis comparativo de tres sistemas de secado con madera de encino (*Quercus* sp). Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 126 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, CHILE. Norma Chilena Oficial NCh. 178. Of. 79. Madera aserrada de pino insigne. Clasificación por aspecto. Santiago, Chile. 7 p.
- KAUMAN, W.; MITTAK, G. 1966. Ensayos de secado de Coigüe (*Nothofagus dombeyi*). Informe técnico No 25. Instituto Forestal, Santiago, Chile. 25 p.
- LÓPEZ P., V. 1985. Secado al aire libre de madera aserrada de *Pinus hartwegii* Lindl. en Chapingo, Estado de México. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 50 p.
- MALDONADO E., D.; PECK, E. C. 1962. Drying by solar radiation in Puerto Rico. Forest Products Journal, 12(10): 487-488.
- MARTÍNEZ P., E. 1984. Secador solar para madera. Nota técnica N° 10. INIREB – LACITEMA. Xalapa, Ver., México. 14 p.
- RODRÍGUEZ A., R.; FUENTES T., F. J.; MONTES R., E. 1989. El uso de secadores solares en la industria de la madera. AMATL. Boletín de difusión No. 4 pp. 22-33. Instituto de Madera Celulosa y Papel. U. de G., Guadalajara, México.
- SIMPSON W., T.; TSCHERNITZ, J. L. 1988. Performance of a solar/wood energy kiln in tropical latitudes. Forest Products Journal, 39(1): 23-30.
- SOLANO, R. 1979. Construcción de una secadora solar para maderas. Primer simposium sobre energía solar. Fundamentos y aplicaciones. Ed. Tecnológica, San José, Costa Rica. s/p.
- TROXEL H., E.; MUELLER, L. A. 1968. Solar lumber drying in Central Rocky Mountain Region. Forest Products Journal 18(1): 19-24.
- VIEHBECK, P. 1999. Lo básico del secado de madera con energía solar. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien- GATE. Trad. Edora Ormaza y Ana M. Galindo. Santa Cruz, Bolivia. 49 p.
- YANG K., C. 1980. Solar kiln performance at a high latitude, 48° N. Forest Products Journal 30(3): 37-40.