

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE INDUSTRIA

**INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:
“Eficiencia y Validación de secadoras solares de madera aserrada para
pequeña y mediana industria”**

Investigadora responsable:

Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc.
Escuela de Ingeniería Forestal

Co investigadores:

Ing. Róger Moya Roque, Ph.D. Escuela de Ingeniería Forestal
Ing. Arys Carrasquilla Batista, M.Sc. Escuela de Electrónica
Ing. Ignacio Del Valle Granados, M.Sc. Escuela de Electromecánica

ENERO 2011



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS
INFORME FINAL DE PROYECTO**

Datos Generales

1. Nombre del Proyecto: **“Eficiencia y Validación de secadoras solares de madera aserrada para pequeña y mediana industria”**
2. Departamento académico o Centro responsable: Escuela Ingeniería Forestal / CIIBI
3. Otros departamentos participantes: Escuela de Ingeniería en Electrónica y Escuela de Electromecánica
4. Investigador(a) responsable: Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc.
5. Investigadores participantes:

Nombre del(la) investigador(a) y grado académico	Jornada en el proyecto (hrs/sem)	Período	N° de meses en el proyecto	Tipo de plaza*
Ing. Cynthia Salas Garita**	16 hr/sem	Del 1 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2010	24	DOC
Ing. Róger Mora Roque	04 hr/sem	Del 1 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2010	24	DOC
Ing. Arys Carrasquilla Batista	08 hr/sem	Del 1 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2009	12	VIE
Ing. Ignacio Del Valle Granados	08 hr/sem	Del 1 de enero del 2009 al 31 de diciembre del 2009	12	VIE

**coordinadora de Proyecto

6. Fecha de inicio formal de la actividad: **1 de enero del 2009**
7. Fecha de finalización formal de la actividad: **31 Diciembre 2010**
8. Sesión y fecha de aprobación de proyecto en la Escuela: **Sesión Ordinaria N° 20-08 del 19 de mayo de 2008 Artículo 5.**
9. Sesión y fecha de aprobación del informe final en la Escuela: **Sesión Ordinaria N° 24-11 del 22 de agosto de 2011 Artículo 4.**

Tabla de contenidos

1.	Datos Generales	ii
2.	Resumen	iv
2.1.	Summary	v
3.	Introducción	1
3.1.	Objetivo General	4
3.2.	Objetivos específicos.....	4
3.3.	Otros objetivos específicos.....	4
4.	Metodología	5
4.1.	Eficiencia en la permanencia de la temperatura de la cámara solar y la evacuación de la humedad ...	5
4.1.1.	<i>Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:</i>	5
4.1.2.	<i>Temperatura y humedad dentro de la secadora:</i>	5
4.1.3.	<i>Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado</i>	7
4.1.4.	<i>Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento</i>	7
5.	Resultados.....	10
5.1.	Eficiencia en la permanencia de la temperatura de la cámara solar y la evacuación de la humedad .	10
5.1.1.	Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:	10
5.2.	Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado	15
5.3.	Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento	18
5.3.1.	Tiempos de secado de madera aserrada y comportamiento de la velocidad del secado a lo largo del año utilizando diferentes métodos de secado.....	18
5.3.2.	Calidad del secado de la madera	25
5.3.3.	Cambios en color por efecto del secado en madera aserrada de <i>Gmelina arborea</i>	30
6.	Difusión de resultados.....	31
7.	Discusión	34
7.1.	Eficiencia en la permanencia de la temperatura de la cámara solar y la evacuación de la humedad .	34
7.1.1.	Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:	34
7.1.2.	-Temperatura y humedad dentro de la secadora:.....	34
7.2.	Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado	36
7.3.	Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento	37
7.3.1.	Tiempos de secado de madera aserrada y comportamiento de la velocidad del secado a lo largo del año utilizando diferentes métodos de secado.....	37
8.	Conclusiones	43
9.	Recomendaciones	45
10.	Agradecimientos	46
11.	Referencias.....	47
12.	Anexos	49

2. Resumen

El proyecto “Eficiencia y Validación de secadoras solares de madera aserrada para pequeña y mediana industria” ha analizado y concretado resultados para un secador solar de madera desde tres áreas. La primera de ellas analizó la eficiencia en la cámara de secado, los resultados de este análisis concluyen que la cámara aprovecha y mantiene la temperatura y la humedad relativa de la cámara sin necesidad de efectuar cambios en el secador, se asegura que con el diseño construido se obtienen velocidades de masa interna del aire que oscilan entre 1 m/s y 2 m/s y que mantiene a lo largo del año, temperaturas internas promedios en el área de secado de 30°C. Otro resultado importante es que al añadir un deshumidificador convencional de uso habitacional es suficiente para bajar la humedad relativa en momentos críticos del secado, sobre todo al inicio del mismo. Se comprobó además que el uso de sustancias desecantes en el horno o un cambio de color en la estructura no añaden ventajas significativas en los parámetros de temperatura y humedad relativa a lo interno de la cámara.

La segunda área fue concretar la obtención de un registrador de datos especialmente diseñado para el secador solar que permite el registro continuo de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara solar y que a la vez administra la apertura y cierre de las ventilas de intercambio de aire del secador con el del ambiente exterior. El registrador obtenido cumple la función de registro, el archivo que se genera es fácilmente visualizable en un programa especialmente diseñado para él y a la vez es manipulable con otros programas compatibles con él como Excel y Word. Además, el programa de lectura permite que las 4 ventilas se abran y cierren en paralelo conforme a la programación que se le dio y que responde a las necesidades de un secado de madera aserrada, pero que a la vez permite el control manual de las ventilas en caso de que el material que se seca no sea madera. El funcionamiento de este dispositivo le da completa autonomía al secador en cuanto a este aspecto de manipulación de humedad relativa interna.

La tercera área de análisis corresponde propiamente al desempeño del secado de madera. Se probó el secado de madera de *Tectona grandis* y de *Gmelina arborea* en el secador solar y se comparó el tiempo y la calidad del secado de la misma con pruebas realizadas al aire y en secador convencional. Los resultados demuestran que mientras que la *T. grandis* alcanza alrededor del 10% de contenido de humedad final entre los 34 días en la estación seca y los 50 días en la estación lluviosa, la *G. arborea* alcanza este contenido de humedad en secado solar entre los 57 días y los 97 días, en las estaciones seca y de transición. La valoración de los defectos producto del secado demuestra que para ambas especies los niveles de defectos alcanzados son similares a los normalmente alcanzados en los secados al aire o en hornos convencionales. Es decir que garantizan una calidad de la madera que es adecuada para las condiciones normales de secado. Igualmente se

constató que la madera sufre cambios de color en el proceso de secado, en el caso de *T. grandis* el cambio de color se da en el nivel de apreciable y en el caso de la *G. arborea* el cambio de color es completamente perceptible al ojo humano.

Palabras clave: secador solar, eficiencia, defectos, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, tiempos de secado

2.1. Summary

The project "Efficiency and Validation of lumber solar dryers for small and medium industries" has analyzed and specified results in a solar dryer for wood including three aspects. The first one was the efficiency of the drying chamber, the results of this analysis concluded that the camera uses and maintain the temperature and relative humidity in the chamber without the need for changes in the dryer, making sure that the design chamber achieves internal air speed ranging from 1 m/s and 2 m/s and it is maintained throughout the year with average internal temperatures in the drying area around 30 °C. Another important result is that adding a conventional dehumidifier for residential use is enough to lower the relative humidity of drying at critical times, especially at the beginning of it. I was also proved that the use of desiccant substances in the solar dryer or changes the wall color does not add significant benefits in the parameters of temperature and relative humidity inside the dryer.

The second area analyzed was to test a data logger specially designed for the solar dryer which allows continuous recording of temperature and relative humidity inside and outside the solar chamber and manages both the opening and closing vents exchanging dryer air to the outside environment. The data logger obtained is so useful as a recorder, the file that is generated is easily viewable in a program specially designed for it, besides it can be manipulated with other programs compatible with it such as Excel and Word. The data logger allows the 4 vents open and close in parallel according to the schedule that was given to respond to the needs of a lumber drying but that also allows manual control vents when the material in the dryer it is not wood. Operation of this device gives full autonomy to the dryer about handling internal and external relative humidity.

The third area of analysis was about the performance of the solar dryer. It was dried wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in the solar dryer and it was compared with air drying and conventional drying tests. The results show that while *T. grandis* reaches about 10% of final moisture content between 34 days in the dry season and 50 days in the rainy season, in the case of *G. arborea* reach this moisture content in solar drying between 57 days and 97 days in the dry and transition season. The assessment of product drying defects for both species shows that defect levels

achieved are similar to those normally achieved in air-dried or conventional ovens. There are guarantee about the quality of wood. It was also found that there are changes in the color of wood because of the effect of drying process, in the case of *T. grandis* color change occurs in appreciable level and in the case of *G. arborea* color change is quite perceptible to the human eye.

Key words: solar dryer, efficiency, defects, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, drying times

3. Introducción

El sector forestal en Costa Rica juega un rol muy importante desde el punto de vista social, económico y ambiental, sin embargo una de sus principales limitantes es que se encuentra poco desarrollado y sin duda alguna requiere de buenos esfuerzos por parte de las empresas, el gobierno y las universidades y demás entes vinculados, para lograr su consolidación.

Es importante indicar que una de las limitantes más grandes a la que se enfrenta el sector forestal latinoamericano, en general, y el costarricense en particular, lo es en el ámbito de la creación de productos de calidad. Ofrecer productos utilizando madera seca es uno de esas limitantes pues nuestro productor aún no oferta de forma masiva al mercado, la madera seca, condición que es indispensable en el campo de la producción forestal como por ejemplo es el caso de los muebles.

Para el secado de la madera tradicionalmente se han utilizado varios métodos que van de simples a complejos, entre los simples, está el secado al aire libre, el cual no requiere ningún tipo de equipo, y entre los sofisticados se encuentran los que requieren equipo especializado, como por ejemplo los que utilizan el secado al alto vacío y con ultrasonido (Fernández-Golfín y Álvarez, 1998).

La tecnología de secado, que se considera intermedia entre lo simple y lo sofisticado, es la que utiliza secadoras solares. Se ha demostrado que en relación con el secado al aire, el tiempo de secado solar se disminuye entre dos y cinco veces, además de que permite obtener madera seca a contenidos de humedad por debajo de la humedad en equilibrio del lugar. Respecto al secado en horno convencional, es de destacar que las instalaciones del secado solar son considerablemente más baratas y los costos de secado se reducen enormemente en los países tropicales, lo que la convierte en una tecnología muy apropiada desde el punto de vista económico y técnico para las pequeñas industrias de la madera (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1989).

Las secadoras solares de madera se han venido utilizado en distintas partes del mundo y muy especialmente en Asia y África, en sus inicios (Martínez-Pinillos, 1997). Con el tiempo, países como Cuba, México, Uruguay, República Dominicana y de forma más cercana Honduras, han desarrollado esta tecnología en sus países. Algunos de ellos se encuentran aún en fase experimental, pero otros, como Honduras, ya aplican esta tecnología a nivel de productores organizados, (Tschernitz, John L.; Simpson, William T, 1985; IUFRO All Division 5 Conference, 1992).

En Costa Rica, antes de los años 1990, la carrera de Ingeniería en Maderas del Instituto Tecnológico de Costa Rica ya había logrado consolidar el funcionamiento de una secadora solar que funcionó poco más de 10 años. Sin embargo, con el traslado de las instalaciones de este departamento al sector Sur del Campus y posteriormente el cierre de esta carrera, la secadora solar, dejó de funcionar.

En el año 1998 el área de Tecnología de Productos Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal, implementó en el núcleo Sur del Campus, una secadora convencional con una capacidad de aproximadamente 25 m³ de madera, con el objetivo inicial de generar investigación en el campo de secado y posteriormente ofrecer servicios de secado a la comunidad más próxima. Dicha secadora produce su fuente de energía con residuos de madera y electricidad.

No obstante lo anterior, con el pasar de los años, los crecientes hechos en torno al cambio climático y la necesidad de innovar, nos llevan, de forma más urgente, a la complementación, e incluso hasta la sustitución del uso de energías tradicionales, por uso de tecnologías limpias, y porque no, hasta más económicas.

En el caso de Costa Rica no se tienen reportes oficiales del uso de secadoras solares, aunque se conoce que algunas industrias pequeñas y medianas utilizan el principio de secadoras solares de forma artesanal.

El proyecto “Eficiencia y validación de secadoras solares de madera aserrada para pequeña y mediana industria” es un proyecto de investigación ejecutado bajo la responsabilidad de la Escuela de Ingeniería Forestal (EIFO). La intención de este proyecto se concretó utilizando la construcción de la secadora solar que se había obtenido a través de una actividad de fortalecimiento ejecutada en el año 2007. La propuesta base en este proyecto pretende analizar y probar el prototipo y efectuar los ajustes pertinentes al modelo que garanticen la eficiencia en el secado utilizando este tipo de tecnología.

El aspecto novedoso de esta construcción está en que el consumo energético de la misma es muy bajo, y las secadoras solares son sistemas de utilización de tecnología limpia, pues la energía de trabajo en el secado tiene su base en la utilización del calor generado por medio de la energía solar.

Desde el punto de vista de capacidad, este prototipo en definitiva responde a las necesidades de nuestra industria nacional, sobretodo en el campo de la mueblería, y a la vez se vislumbra que se

ajusta de muy buena manera al secado de especies de rápido crecimiento proveniente de plantaciones forestales, su capacidad de 6,6 m³ que es apta para la pequeña y mediana industria forestal en Costa Rica.

Este tipo de tecnología reúne muchas bondades, por un lado se constituye en una tecnología que utiliza eficientemente la energía solar, una energía que es abundante y gratuita en nuestra latitud (Helwa, Khater et al, 2004). Por otra parte, la experiencia ha demostrado que el secado en cámaras con energía solar es la mejor variante de los sistemas existentes en secado, debido a que requiere un consumo mínimo de energía convencional, con gastos de inversión mínimos, comparados con los secadores que utilizan combustibles y residuos de la madera, ya que las secadoras solares no requieren en su diseño básico invertir en hornos, calderas ni plantas trituradoras de desperdicios (Bérriz, 2003).

Costa Rica requiere con urgencia elevar el valor agregado de los productos forestales, y en el proceso de añadir ese valor, el secado de la madera se encuentra entre los primeros. Las industrias costarricenses no tienen la capacidad de efectuar altas inversiones para adquirir hornos de secado convencional, y además invertir en su mantenimiento, que es costoso y delicado; pero tampoco puede darse el lujo de continuar ofreciendo productos acabados con madera secada al aire, la cual no permite tener productos de calidad.

La necesidad de investigar sobre los posibles ajustes al prototipo existente nos permiten elevar la eficiencia del secador en cuando a la circulación del aire y el mantenimiento de la temperatura, así como automatizar algunos elementos básicos que registran las condiciones ambientales internas y externas de la cámara, específicamente en lo que se refiere a temperatura y humedad relativa y finalmente validar el uso de la secadora solar caracterizando el secado de especies de plantación de rápido crecimiento desde el punto de vista de tiempos de secado y calidad de secado y comparando su comportamiento frente a los otros dos métodos de secado mayormente utilizados en Costa Rica, los cuales son el secado al aire y el secado en horno convencional.

El papel de nuestra universidad como formadora de profesionales y su compromiso con la sociedad del conocimiento nos involucra y compromete con el desarrollo integral de la sociedad costarricense. En nuestro caso muy particularmente con esa parte de la sociedad que está directamente involucrada con el sector forestal, el cual urge de acciones que permitan fortalecer la pequeña y mediana empresa forestal. Estas urgen de apoyo para ser competitivas en un mercado que se globaliza, y precisan de

tecnologías que incremente el valor agregado de su producción al mismo tiempo que las mismas sean tecnologías idóneas a su condición de producción, y cumplan con ser limpias y sostenibles en cuanto al uso energético. En este sentido las secadoras solares cumplen con este difícil reto, pero antes de ofrecerlas como solución tecnológica masiva se requiere de la investigación mínima necesaria que permita posesionarlas en un futuro cercano en nuestro mercado nacional.

En este sentido es que se formuló la propuesta de investigación, la cual una vez ejecutada presenta sus resultados en este documento, el reto de este proyecto fue producir la investigación mínima necesaria que permitiera en el corto plazo, obtener la validación que exige la tecnología. Etapas posteriores de un proyecto como este permitirían la socialización de la tecnología en el mercado nacional visualizando su implementación en la pequeña y mediana industria forestal, pero primero se ha hecho la validación del modelo.

3.1. Objetivo General

Mejorar la eficiencia en el sistema de secado solar de madera con el fin de validar su uso en el secado de especies de plantación de rápido crecimiento

3.2. Objetivos específicos

- Optimizar la eficiencia en el secado mejorando la distribución de la masa de aire dentro de la cámara de secado y evitando las pérdidas de calor hacia el exterior.
- Automatizar el registro de temperatura y humedad relativa internas y externas a la cámara de secado y la apertura y cierre de las ventanillas de intercambio de aire.
- Caracterizar el secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento utilizando una secadora solar de madera.

3.3. Otro objetivo específico

- Dar a conocer al público los usos y el secado de madera aserrada en un secador solar

4. Metodología

4.1. Eficiencia en la permanencia de la temperatura de la cámara solar y la evacuación de la humedad

4.1.1. Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:

Se analizó el comportamiento de los flujos de aire en el interior de la cámara, para esto se utilizó un anemómetro marca kestrel modelo 3000 y se determinó la velocidad de la masa de aire antes de entrar a la pila de madera, en medio de la pila de madera y al salir de la pila de madera. En cada punto se efectuaron 3 mediciones de velocidad de aire, con esta información se calculó el promedio de la misma en los estratos bajos, medios y altos de la zona de secado tal como se aprecia en la Figura 1.

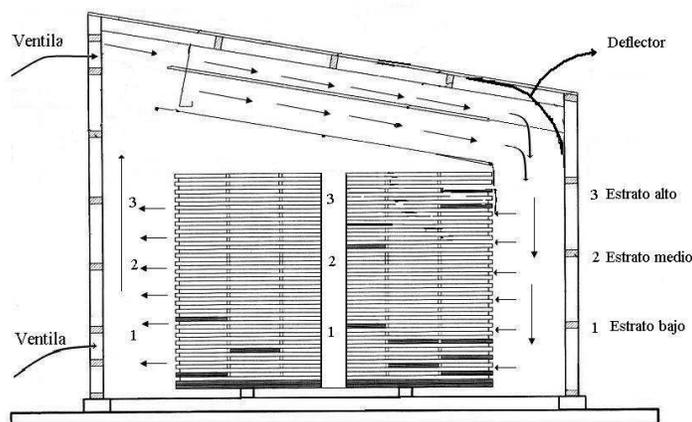


Figura 1. Puntos de medición de la velocidad de la masa de aire

4.1.2. Temperatura y humedad dentro de la secadora:

- Se comparó si hubo un efecto estadísticamente significativo en la permanencia del calor interno de la cámara, en relación con el color de la cámara.

Temperatura y humedad relativa fueron evaluados dentro y fuera de la cámara solar. La intención de esta medición tuvo como propósito determinar si existían pérdidas extraordinarias de temperatura y a la vez determinar las condiciones de humedad relativa dentro de la cámara. Estas dos variables ambientales se midieron en dos sentidos, primero se hizo una revisión general de la secadora para

determinar si existía alguna fuga de temperatura en la estructura principal. Luego se efectuó un ensayo con modelos a escala que permitieron determinar el efecto de utilizar sustancias desecantes y el color de la cámara en la temperatura y la humedad relativa y comparar esto a la escala de la secadora solar.

Se construyeron 3 modelos a escala (1:4,73) los cuales se colocaron en el mismo sector donde se ubica la secadora solar, estos modelos a escala se construyeron con los mismos materiales que la secadora solar y se aplicó un color rojo óxido en uno, un color negro mate en otro y finalmente otro quedó en el color original blanco hueso, como testigo dentro del experimento.

En estos modelos a escala se instaló un medidor de temperatura y humedad relativa y a lo largo del año 2009 en 3 períodos diferentes: estación seca, estación lluviosa y estación intermedia; se procedió a medir las condiciones ambientales internas de la cámara en relación con el exterior de las cámaras y la condición de la secadora solar original. La información fue obtenida utilizando un termo-higrómetro marca Radio Shack portátil Modelo 63-1032, que permite obtener la medición de la temperatura y la humedad relativa a lo interno de la cámara evaluada y a la vez la temperatura externa a la cámara, el intervalo de medición fue de una medición por hora.

Se comparó si hubo un efecto estadísticamente significativo en la permanencia del calor al colocar sustancias higroscópicas en el piso de la cámara solar.

Para medir el efecto de sustancias desecantes en la temperatura y la humedad relativa de la cámara solar se utilizaron los mismos prototipos y se probó en ellos el uso de 3 sustancias desecantes: cloruro de sodio (NaCl) conocida en el mercado popular como balde seca, cloruro de magnesio (MgCl₂) y gel de sílica con sustancia reveladora color azul que le da el cloruro de cobalto (sustancia granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico). La cantidad de sustancia utilizada es la misma que recomienda el fabricante para los 3 productos, 200 gr /m³.

Toda la ejecución y procesamiento de información estuvo a cargo del Ing. Ignacio del Valle Granados, investigador de la Escuela de Electromecánica. Con los resultados obtenidos en estos ensayos se procedió a efectuar los ajustes correspondientes a la cámara solar.

4.2. Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado

Se diseñó, desarrolló e implementó un dispositivo electrónico que permita controlar las ventilas de intercambio de aire y además recopila información de humedad y temperatura tanto dentro como fuera de la secadora. Para lograr esto la Escuela de Electrónica, a través de la participación de la Ing. Arys Carrasquilla Batista, desarrolló un circuito impreso, el dispositivo permite registrar en tiempo real la temperatura interna y externa de la cámara así como la humedad relativa de las dos condiciones ambientales. El desarrollo de este dispositivo, tipo data logger, logró guardar en una llave maya (memoria flash) un archivo de texto que luego puede ser visualizado en pantalla utilizando un programa en “delphi” desarrollado especialmente para esta visualización. El diseño de este capturador de datos, se hizo a través de una práctica de especialidad de la Escuela de Ingeniería Electrónica, dirigida por la investigadora Carrasquilla. Se realizaron pruebas del prototipo a nivel de laboratorio y de la secadora solar para madera las cuales permitieron comprobar y mejorar el dispositivo propuesto.

Una vez alcanzados los resultados esperados en cuanto al almacenamiento de datos y control del intercambio de aire, se procedió a la validación por parte los usuarios finales e instalación final del dispositivo.

4.3. Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento

– **Tiempos de secado de madera aserrada y comportamiento de la velocidad del secado a lo largo del año utilizando diferentes métodos de secado**

- ✓ Se realizaron 3 pruebas de secado para las especies *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*, para un total de 6 cargas de secado en todo el proyecto. La carga seca fue de al 2 m³ por prueba por tratamiento
- ✓ El secado de madera aserrada se realizó bajo 3 tratamientos con el fin de comparar el tiempo de secado en la cámara solar con los métodos de secado al aire y en horno convencional
- ✓ La determinación del comportamiento del contenido de humedad en cada tratamiento se realizó utilizando muestras testigos distribuidas en la pila de madera de cada tratamiento
- ✓ Para recolectar la información del tiempo de secado se debió determinar el contenido de humedad inicial y se debió monitorear el comportamiento de ese contenido de humedad en la madera, de forma periódica

- ✓ Utilizando técnicas no destructivas se midió la correlación que pueda existir entre el contenido de humedad de la madera y la velocidad de las ondas que generan un ultrasonido.
- ✓ Se recolectó información diaria de la temperatura y la humedad relativa interna y externa a la cámara de secado solar.
- ✓ En todos los casos se utilizaron para el secado separadores de madera de 2,54 cm de lado.

– Calidad del secado de madera

Utilizando las mismas pruebas en donde se determinó los tiempos de secado por tratamiento, también se determinó la calidad del secado de madera, con el fin de determinar si hubo un efecto significativo entre los tipos de daño o defectos, asociados al tipo de método de secado

- ✓ Antes de la prueba de secado en cada tratamiento, se determinó en una muestra de 30 piezas para cada tratamiento y en cada especie la presencia de 5 tipos de defectos:

1. Rajaduras
2. Grietas
3. Encorvadura
4. Alabeo
5. Acanaladura

- ✓ Después de la prueba de secado, en cada tratamiento, se determinó en una muestra previamente definida la presencia de 6 tipos de defectos:

1. Rajaduras
2. Grietas
3. Encorvadura
4. Alabeo
5. Acanaladura
6. Manchas o marcas por separador (solo se mide después del secado)

- ✓ Los tratamientos y estratos que se definieron para las pruebas son:

Tratamiento 1: Secado en secadora solar

Tratamiento 2: Secado al aire

Tratamiento 3: Secado en horno convencional

- ✓ En cada tratamiento se definió:

- i. Estrato alto
- ii. Estrato medio
- iii. Estrato bajo

Las pruebas de secado de cada tratamiento se realizaron simultáneamente a lo largo del año y según la siguiente programación:

Primera prueba: entre los meses de Enero a Abril

Segunda prueba: entre los meses de Mayo a Agosto

Tercera prueba: entre los meses de Setiembre a Diciembre

La información fue analizada con el programa estadístico SAS.

5. Resultados

5.1. Eficiencia en la permanencia de la temperatura de la cámara solar y la evacuación de la humedad

5.1.1. Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:

Se hizo una revisión general de la cámara de secado en aspectos concernientes a fugas de aire, o entradas de aire. Se determinó que las puertas están bien selladas y los hules están cumpliendo su función. En las ventilas de intercambio de aire, si bien no están cerradas herméticamente tampoco se registró una salida extraordinaria¹ de temperatura, por lo que se tomó la decisión de no efectuar ningún ajuste de este aspecto en la cámara.

Adicionalmente, se midió la velocidad de la masa de aire, a través de la pila de madera, conforme a la metodología elegida inicialmente. Con los resultados de las 3 mediciones de velocidad de masa de aire en cada estrato definido por la altura y las 3 mediciones a lo ancho de la pila, específicamente al ingreso de la corriente de aire, al centro de la pila y a la salida de la pila, cada medición con 3 repeticiones, se determinó que la velocidad promedio de aire pasando por la pila es de 1,5 m/s, siendo la velocidad más alta al ingreso de la pila con un promedio de 2 m/s y la velocidad de salida con un promedio de 1 m/s. Las velocidades más altas se registran en el estrato superior de la pila de madera y las menores mediciones en el estrato inferior.

5.1.2. Temperatura y humedad dentro de la secadora:

Toda esta etapa del proyecto fue desarrollada con la participación del Ing. Ignacio del Valle de la escuela de Electromecánica, su participación se dio entre enero y diciembre del 2009.

El primer aspecto analizado en relación con la temperatura y humedad relativa de la cámara de secado solar consistió en un experimento hecho a escala (1:4,73) y que luego fue comparado con la situación del secador en tamaño real. Los resultados de este experimento son variados y utilizaron la técnica de descarte antes de pasar a la siguiente etapa de análisis. La primera prueba que se hizo fue sobre el efecto del color de las paredes externas de la cámara y el mantenimiento de la temperatura dentro de la cámara.

Para este análisis se partió de la siguiente hipótesis:

Se puede incrementar la temperatura interna del secador al aprovechar las paredes externas como colectores de radiación solar; para esto se supone que entre más oscuro sea el color utilizado (siendo blanco el más claro y negro el más oscuro posible) mayor será la temperatura interna.

¹ Una fuga extraordinaria de la cámara significaría que la temperatura interna es igual a la externa o al menos muy cercanas entre sí, en este caso no sucede de esta forma, como se verá en los datos presentados más adelante en esta misma sección de resultados

Para la realización de esta etapa del experimento se utilizó modelos del secador solar construidos a escala (1:4,73). Para su construcción se utilizaron los mismos materiales en la construcción de los prototipos que los utilizados en la construcción del secador real y para comparar los efectos de la radiación solar en las paredes, se utilizaron tres tonos de pintura distintos: blanco, rojo óxido y negro, tal como se indicó en la metodología.

De manera general, tal como se observa en el Cuadro 1, la temperatura interna en el secador negro es mayor a la de los secadores blanco y rojo, todos en las mismas condiciones ambientales, estructurales y de localización.

Cuadro 1. Temperatura interior y humedad relativa para tres modelos a escala del secador solar

Hora	Modelo Rojo		Modelo Blanco		Modelo Negro	
	Temperatura interior (°C)	Humedad Relativa (%)	Temperatura interior (°C)	Humedad Relativa (%)	Temperatura interior (°C)	Humedad Relativa (%)
9:00	29.1	72	28.9	72	31.1	64
10:00	36.3	61	35.4	59	38.3	55
11:00	38.4	57	37.9	55	40	51
12:00	37.2	54	37.1	54	39.3	50
13:00	40.3	46	39.7	52	43.1	41
14:00	42.3	43	41.6	43	45	37
15:00	38.4	50	38.3	52	40.4	41

Fuente: Datos de campo

En el caso del secador blanco y del rojo, comparando su respectiva temperatura interna, no se encuentra diferencia significativa. Teniendo que la ganancia de calor por el techo es igual para todos los prototipos, la ganancia por comparar es la que se da en las paredes debido al color con que fueron pintados; si $\alpha_{solar, blanco} = 0.26$ y $\alpha_{solar, rojo} = 0.91$ se tiene que la ganancia de calor del prototipo rojo es mayor a la del prototipo blanco. Esto provoca un aumento en la temperatura en el secador rojo respecto al blanco.

En el caso del secador negro respecto del secador blanco, la ganancia de calor en el prototipo negro es mayor debido a que $\alpha_{solar, negro} = 0.98$, lo cual provoca que la temperatura interna del secador negro sea más alta que la del secador blanco.

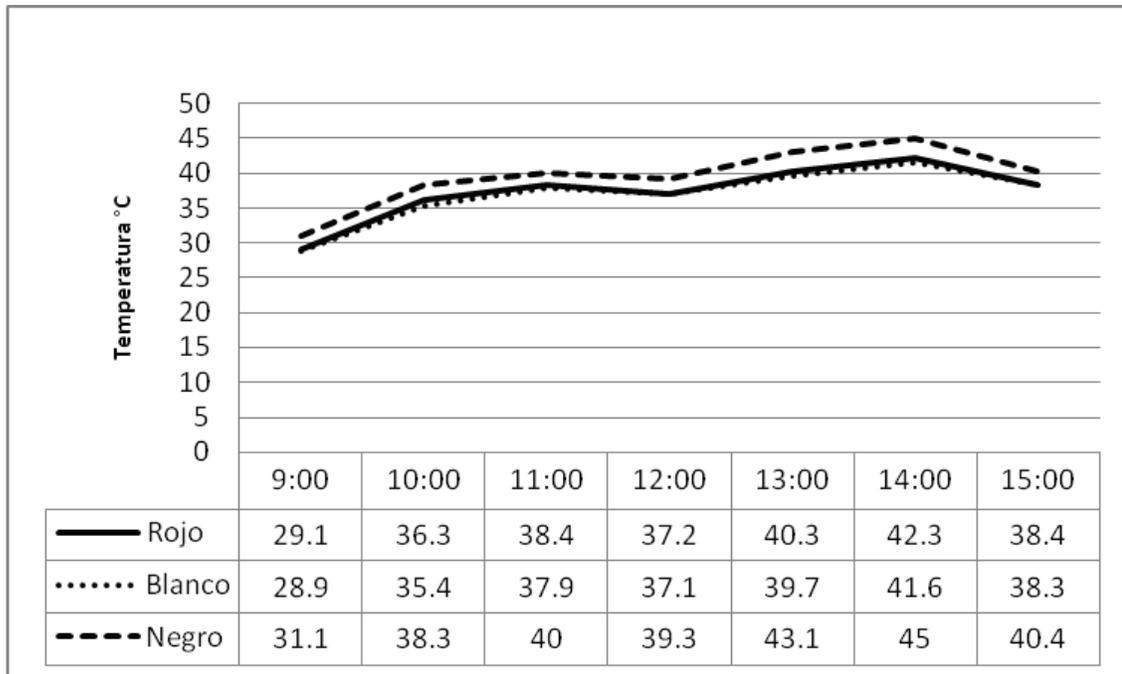


Figura 1. Temperatura de los secadores solares en función del color exterior de sus paredes

La diferencia de temperaturas internas del secador negro y el secador blanco, (Figura 2) presenta poca variación a través del tiempo, su significado radica en que si esta diferencia es constante, el ritmo de incremento de temperatura es igual para ambos prototipos, dando como resultado que el incremento de calor es independiente del color del secador en este estudio.

Las variaciones existentes con este parámetro confirman que en ciertos intervalos, esa diferencia es creciente y particularmente en el período comprendido entre las 11 am y la 1 pm; así el secador negro logra una velocidad de incremento de temperatura mayor que la del secador blanco, durante ese período, en las mismas condiciones ambientales, estructurales y de localización.

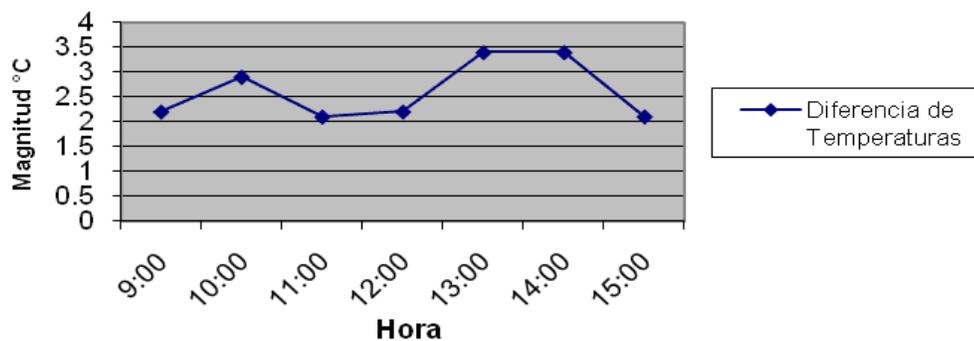


Figura 2. Diferencias internas de temperaturas entre los secadores negro y blanco

Tomando los datos de temperatura de los tres secadores y aplicando un análisis de varianza a éstos, el resultado obtenido es que no se tiene una diferencia significativa de temperatura aunque el secador negro alcanza mayor temperatura. Tampoco existe una diferencia significativa de temperatura y humedad relativa al utilizar un secador rojo y uno blanco.

El secador solar negro logra un mayor aprovechamiento de la energía del sol, cuyas paredes absorben el 98% de la energía solar, mientras que el blanco absorbe un 26% y el rojo un 91%, (aunque para el caso del color rojo podría no ser el valor real debido a que el color utilizado no es un rojo intenso).

Según el análisis de varianza aplicado a los datos recopilados, la humedad relativa (H.R.) no presenta gran variación respecto al color utilizado, la mayor diferencia de H.R. se presenta en el lapso comprendido entre las 10 AM y las 3 PM, dándose un incremento en el intervalo de las 11am a la 1 pm, periodo en el cual también se dan los incrementos más notorios de temperatura interna.

La segunda prueba experimental que se realiza utiliza las sustancias desecantes dentro de la cámara de secado solar, para ver su efecto en la humedad relativa interna al secador. Para este análisis solo se utilizó los secadores negro y blanco y se partió de la siguiente hipótesis:

Con la utilización de sustancias desecantes, se puede evacuar mayor cantidad de humedad en el aire logrando condiciones de humedad relativa más baja dentro del secador.

De los datos tomados respecto a la comparación de los desecantes, Cloruro de Magnesio, Cloruro de Calcio y Sílica Gel se establece que es este último el que propicia las mejores condiciones para la operación de un secador solar y en general para el proceso de secado de la madera (Temperatura Alta y baja H.R.), y es el desecante utilizado para las mediciones de los prototipos a escala.

Aplicando el análisis de varianza a la colección de datos se establece que no hay diferencia significativa en la humedad relativa al utilizar desecante en el secador blanco y en el secador negro.

Analizando los datos del secador blanco con desecante y el blanco testigo, éste último presenta mejores condiciones de operación que el primero; se establece que utilizando desecante, la temperatura y la H.R. presentarían un comportamiento similar al que dio el sílica gel para su escogencia. El comportamiento fue totalmente lo contrario a lo esperado, puede deberse a que si estrictamente los secadores blancos tienen una velocidad de ganancia de temperatura igual, el sílica gel se pudo haber saturado en algún momento o bien parte de la humedad externa migró hacia el secador. Al momento de sacar el sílica gel, este se encontraba de color blanco, lo que indica que fue utilizada toda su capacidad de absorción, este color se observaba al medio día.

Particularmente, en la franja de horario de 11 am a 3 pm, se observan cambios significativos en la Humedad Relativa ambiental exterior y dentro de los prototipos.

El comportamiento de la variable estudiada en el caso del prototipo con desecantes varió significativamente al momento de haber condiciones lluviosas, lo que implica mayor H.R. en el ambiente.

Considerando que el secador blanco fue el que dio las mejores condiciones al utilizar sustancia desecante se comparó estos resultados con la situación del secador solar en tamaño real y los resultados en este caso es que hay una diferencia de 3 °C de temperatura interna entre el secador solar a escala y el secador solar en tamaño normal siendo más alta la temperatura en el secador a escala.

Con respecto a la humedad relativa se encontró que el secador solar de tamaño real tiene una humedad relativa estadísticamente igual a la humedad relativa registrada en el modelo a escala con sustancia desecante.

También se observó que el secador a escala con sustancia desecante tiene una humedad relativa promedio de 90,8%, mientras que el secador solar en tamaño real registra una humedad relativa de 75,4% cuando utiliza un deshumidificador tipo comercial.

-Resultados particulares para el secador solar color blanco en tamaño real:

Se observó que las vigas de soporte del techo de vidrio experimentaron un alto nivel de contracción que ocasiona que cuando llueve se den filtraciones de agua no en las uniones vidrio-madera, las cuales están debidamente selladas, sino a través de rajaduras que se hicieron en la madera. Por este motivo se cambió todo el techo de la secadora en setiembre del 2010, colocando como material de soporte un material de aluminio más estable dimensionalmente, con el objetivo de evitar el inconveniente de goteos en la cámara solar.

En relación con la humedad relativa, se llevó registros de humedad relativa durante los procesos de secado en las estaciones seca, lluviosa y transición durante los dos años de medición y se encontró que los mismos están acordes con la condición de secado. Al inicio se encontró que la humedad relativa era muy difícil de disminuir aún manteniendo abiertas las ventilas de la cámara durante períodos de 5 días completos y 6 horas continuas cada día, razón por la cual se tomó la decisión de instalar un deshumidificador comercial de los que se usan en habitaciones. Al respecto se encontró que la disminución de la humedad relativa es rápida y sin la necesidad de estar pendiente de la humedad relativa externa para asegurar que el secado se está dando.

Cuadro 1. Registro mínimo, máximo y promedio de temperatura y humedad relativa obtenidos durante los procesos de secado realizados para el proyecto.

<i>Característica</i>	2009		2010	
	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
Mínima dentro del secador	17,4	34,9	21,5	26,1
Máxima dentro del secador	78,0	96,2	71,0	98,1
Promedio dentro del secador	29,3 (5,3)	77,6 (17,4)	30,3 (4,7)	67,2 (14,55)
Diferencia entre mínimas y máximas interna y externa	6,4-50,0	N.R	6,5-43,0	N.R
Mínima ambiental	11,0	N.R	15,0	N.R
Máxima ambiental	28,0	N.R	28,0	N.R

N.R. No fue posible tomar el registro debido a limitaciones en la disponibilidad de equipo de medición

En el cuadro 1 se presenta el detalle de la temperatura alcanzada dentro de la cámara y puede verse en los resultados que la cámara alcanzó los rangos más grandes de variación de la temperatura durante el año 2009 que fue el año que se hizo el secado de la madera de *Tectona grandis*, mientras que un año después, los rangos variaron de forma importante en el máximo. También es importante observar que la humedad relativa promedio interna en la cámara fue 10,4% más alta en el año 2009 con respecto al 2010, esta situación se explica en parte porque la madera que se secó en el año 2010 tenía un contenido de humedad mayor al que tenía la madera que se secó en el año 2009, este hecho ocasiona que al darse el proceso de secado la cámara pase más húmeda cuanto más húmeda ingrese la madera pero también es importante anotar que a pesar de las diferencias, éstas no son significativas en los contenidos de humedad relativa ni en temperatura entre un año y otro.

5.2. Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado

Esta etapa del proyecto contó con la participación de la ingeniera Arys Carrasquilla Batista de la escuela de Electrónica, quien fue la líder para concretar el desarrollo de un prototipo electrónico que permitiera obtener un registro continuo de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado y que a la vez permitiera la apertura y cierre de las ventilas utilizando un damper motorizado.

La recomendación del tipo de compuerta motorizado estuvo a cargo del Ing. Ignacio del Valle, él recomendó la instalación de 4 compuertas (damper RD 10 Duro Zone). Estas compuertas tienen la característica de ser redondos y ajustables al tamaño de la ventila actualmente existente. El motor de trabajo que tienen las compuertas consiste en un motor pequeño de 24 v que se pueden conectar en paralelo al dispositivo de registro que se diseñó.

El prototipo de registro de temperatura y humedad relativa se conecta a 110 v. Desde el punto de vista de hardware es un dispositivo rectangular con una pantalla de programación.

Para el desarrollo de este dispositivo se estableció desde el inicio los parámetros de programación y hardware mínimos necesarios para el dispositivo que consistieron en lo siguiente:

- ✓ Pantalla de programación
- ✓ Registro de la fecha y la hora
- ✓ Manipulación de la frecuencia de medición o lecturas de temperatura y humedad relativa interna y externa
- ✓ Grabado de datos en un dispositivo portátil tipo USB flash drive o “llave maya”
- ✓ Alimentación 110 v
- ✓ Orden de apertura y cierre de ventilas de forma automática y manual.

Los aspectos técnicos referentes a los parámetros de programación para la apertura y cierre de ventilas fueron dados por los Ing. Cynthia Salas y Róger Moya. El dispositivo permitir abrir automáticamente las ventilas siempre que se cumpla con los siguientes aspectos:

- ✓ La apertura automática se da estrictamente entre las 6 am y las 12 md
- ✓ La apertura se da solo si la humedad relativa interna es mayor a la humedad relativa externa
- ✓ La ventila no se abre si la humedad relativa externa es superior a 90%, aún cuando esta humedad relativa sea inferior a la interna.
- ✓ Cuando la humedad relativa interna es menor a 60% aunque la humedad relativa externa sea inferior no se permite la apertura de ventilas
- ✓ La apertura de ventilas de forma automática no se hará si el registro continuo lleva acumuladas más de 3 semanas de registro.
- ✓ El sistema permite un modo de apertura de ventilas en forma manual sin que el registro de temperatura y humedad se vea interrumpido.

Estos elementos fueron considerados en la programación hecha para elaborar el dispositivo el cual utiliza programación en Delphi 7.

Para la descarga de datos se elaboró un programa especial de visualización que permite ver los datos en lista y visualizarlos a su vez en un gráfico separado de temperatura y humedad relativa, a su vez los gráficos permiten agrandar el detalle visual de los datos que se consultan, con una herramienta de ampliación, popularmente conocidas como “zoom.”

El archivo de descarga es apreciablemente liviano pues guarda en formato de texto (*.txt) y este archivo es completamente compatible para ser descargado en cualquier hoja electrónica tipo Excel o en procesador de texto tipo Word o equivalentes.

En la Figura 3 se muestra la interfase de salida de datos en el programa Delphi  donde se puede observar la lista de datos y los gráficos de salida por separado para cada parámetro ambiental registrado.

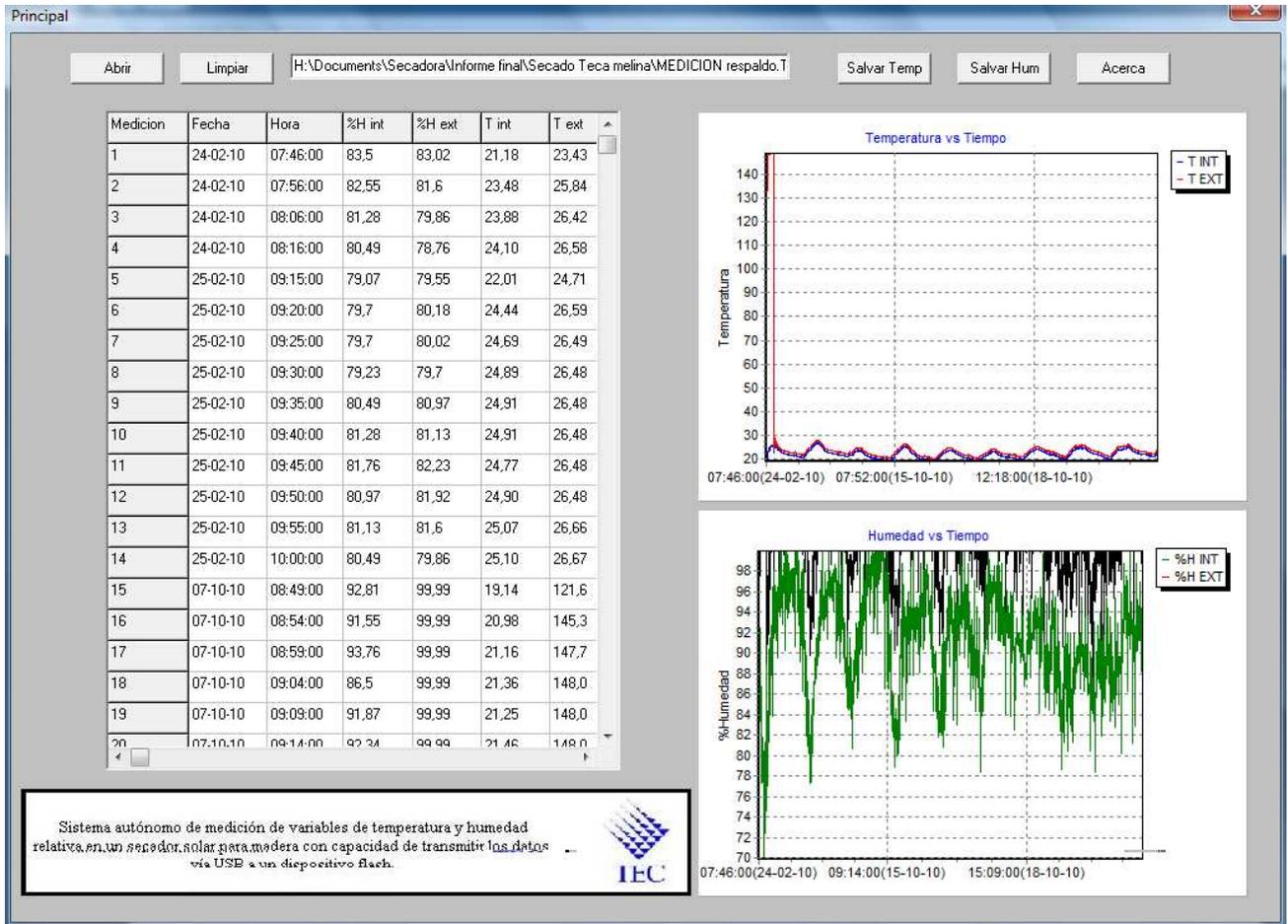


Figura 3. Interfase visual del programa Delphi para descarga de datos registrados por el dispositivo registrador.

En el anexo 1 de este informe se encuentra el manual de operación completo del dispositivo.

5.3 Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento

5.3.1. Tiempos de secado de madera aserrada y comportamiento de la velocidad del secado a lo largo del año utilizando diferentes métodos de secado

5.3.1.1. Secado de *Tectona grandis*

Se realizaron 3 pruebas diferentes de secado de madera de *Tectona grandis*. La razón de realizar 3 pruebas diferentes se debe a que es necesario para efectos de validar el secado ver el comportamiento del secador a lo largo del año justamente por las diferencias que se dan en la incidencia de luz sobre el colector solar y sobre las horas disponibles de luz dependiendo de la estación del año. Como ya se indicó metodológicamente se resolvió definir tres estaciones, una seca, una lluviosa y una de transición. Bajo estas condiciones se efectuó una corrida de secado tanto en el secador solar (S.S.) como en el secador convencional (S.C.) y secado al aire (S.A.), para comparar los resultados.

El Cuadro 2 brinda información del peso específico y las propiedades de la madera relacionadas al secado de *T. grandis* en los diferentes métodos de secado. Es importante hacer notar que el valor de peso específico (P.E.) y el contenido de humedad inicial (C.H. i) fue estadísticamente similar en los diferentes tipos de secado ($\alpha < 0,05$), excepto en la madera que se utilizó en la estación seca para secado en horno convencional que presentó un C.H.i más bajo que los otros secados. La madera utilizada en el secado fue extraída de un solo lote de plantación y las tablas fueron seleccionadas aleatoriamente de ese lote con el fin de no producir sesgos en la información referida al P.E. y al C.H.i y así no tener influencia de esta variable en el secado. Los valores promedios de P.E. y C.H.i para cada tipo de secado en las diferentes épocas del año cumplió este objetivo. La única diferencia que presentó el C.H.i fue para el S.C., diferencia que puede ser explicada por que este secado se inició con 30 días de diferencia de los otros dos secados y por tanto la madera ingresó al secador más seca que las demás.

Cuadro 2. Información general de las condiciones de secado de *Tectona grandis* y sus principales resultados según los parámetros evaluados

Parámetros	Tipo de secado	Estación		
		Seca	Transición	Lluviosa
Peso Específico	Solar	0,64 (0,06) A	0,64 (0,05) A	0,56 (0,02) A
	Aire	0,63 (0,02) A	0,58 (0,04) A	0,59 (0,04) A
	Convencional	0,58 (0,03) A	0,60 (0,08) A	0,56 (0,03) A
C.H inicial (%)	Solar	83,88 (5,3) A	108,91 (14,51) A	75,59 (22,08) A
	Aire	62,56 (26,27 - 42) AB	94,72 (22,95) A	77,69 (24,3) A
	Convencional	56,91 (15,31) B	97,96 (13,56) A	93,21 (23,81) A
C.H. Final (%)	Solar	8,56 (0,66) A	9,42 (0,61) A	6,57 (0,49) A
	Aire	15,74 (0,70) B	17,37 (3,27) B	18,7 (2,94) B
	Convencional	4,9 (0,6) A	7,02 (2,94) A	7,43 (1,59) A
Tiempo de secado (días)	Solar	33,90	43,79	50,10
	Aire	44,99	60,92	59,04
	Convencional	9,90	9,89	9,83
Tasa de secado (% / día)	Solar	2,22	2,27	1,38
	Aire	1,04	1,18	0,99
	Convencional	4,80	9,19	8,72

Los números entre paréntesis presentan la desviación estándar, y fueron utilizados 6 muestras para determinar estos parámetros, excepto en el secado convencional de la estación seca donde solo fue posible utilizar 5 muestras testigo

A y B muestran las diferencias significativas ($\alpha=0,05$)

Al finalizar el secado, los diferentes métodos producen un contenido de humedad final (C.H.f) con diferencia significativa ($\alpha<0,05$). La madera secado en S.S. y S.C. en cualquier época del año produce C.H.f menores a los que se logra en el S.A., teniendo la ventaja de que las humedades de la madera sean menor al 10% (Cuadro 2) esto se debe a que las condiciones de temperatura y humedad relativa en el S.S. y S.C. son controladas para producir un contenido de humedad en equilibrio (CHE) deseado aunque en S.S. no son con la misma facilidad que en el S.C. En el caso del S.A., los C.H.f están en función de las condiciones meteorológicas imperantes en el sitio cuyas condiciones determinan en definitiva el contenido de humedad en equilibrio (CHE). Para la zona de Cartago tal como se ve en la Figura 4 producen un CHE de alrededor del 16% durante la estación seca y entre 18-20% en la estación lluviosa.

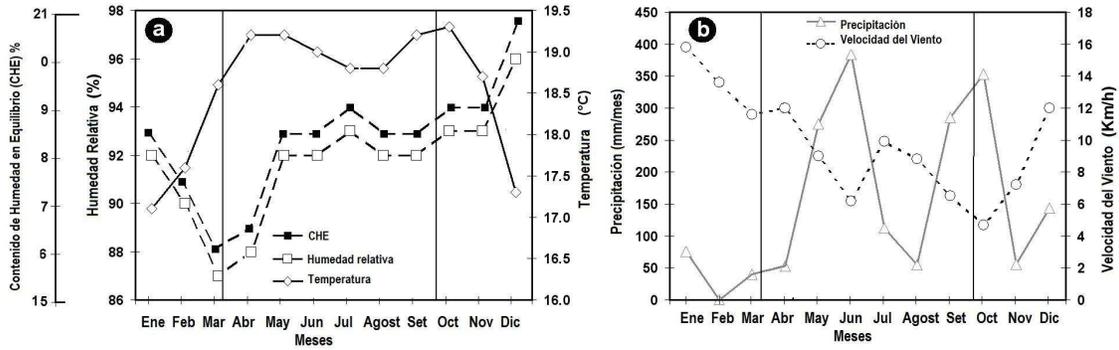


Figura 4. Condiciones ambientales de la Ciudad de Cartago-Costa Rica para los diferentes meses del año. Información tomada de la estación Meteorológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica entre 1993-2003.

En relación con la forma de secado en los diferentes métodos conforme avanza el tiempo de secado, inicialmente se propuso hacerlo en una tabla de tiempo de secado; finalmente se tomó la decisión de presentar los resultados en curva de secado para mejor visualización. En este sentido se obtuvieron resultados que indican que el S.C. tiene una pendiente alta pero como puede verse en la Figura 5, bastante constante, mientras que el S.S. tiene una pendiente más pronunciada que la curva de S.A. pero bastante menos pronunciada que la de S.C., esto mismo se puede ver cuando se reporta la tasa de secado diaria en los diferentes tipos de tratamiento (Cuadro 2). En el caso del secado solar y al aire empieza a ocurrir un cambio en la tasa de secado después de los 20 días de iniciado y es importante hacer notar que cercano al 30% del contenido de humedad esa pendiente de la curva cambia para el secado solar y el secado aire, explicado en buena parte porque debe aplicarse mayor esfuerzo energético en eliminar el agua atada, para continuar con el proceso de secado.

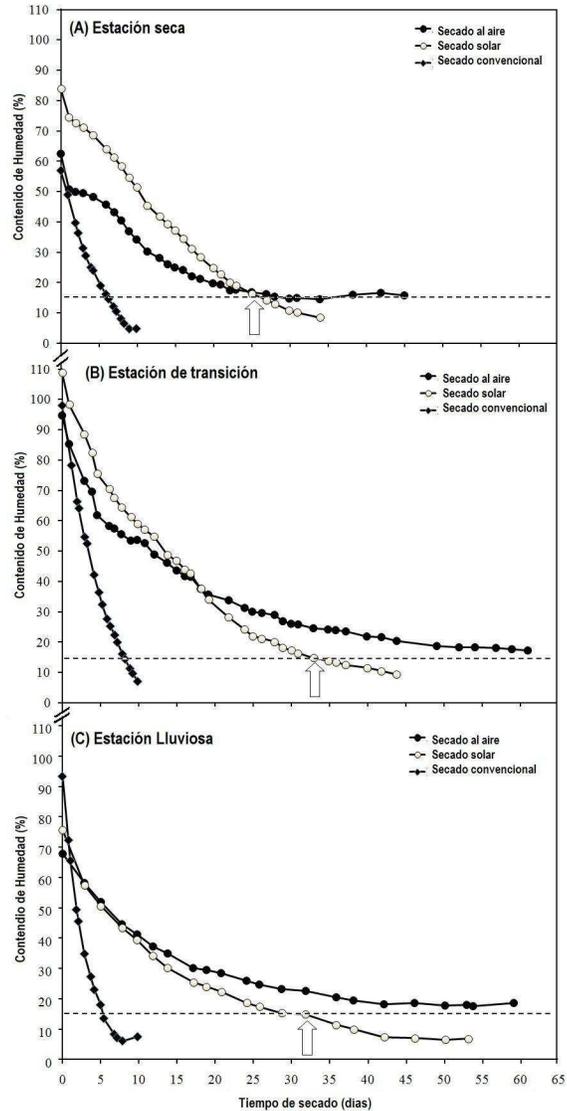


Figura 5. Variación del contenido de humedad de *Tectona grandis* en secado al aire, secado solar y secado convencional en 3 diferentes épocas del año.

5.3.1.2. Secado de *Gmelina arborea*

Se realizaron 3 pruebas diferentes de secado de madera de *Gmelina arborea*. La razón de realizar 3 pruebas diferentes es la misma que se indicó cuando se realizó la descripción del secado de *T. grandis* y se debe a que es necesario para efectos de validar el secado ver el comportamiento del secador a lo largo del año justamente por las diferencias que se dan en la incidencia de luz sobre el colector solar y las horas disponibles de luz dependiendo de la estación del año. Como ya se indicó metodológicamente se resolvió también definir tres estaciones, una seca, una lluviosa y una de transición. El Cuadro 3 brinda información del peso específico y las propiedades de la madera

relacionadas al secado de *G. arborea* en los diferentes métodos de secado. El valor de peso específico (P.E.) y el contenido de humedad inicial (C.H. i) fue estadísticamente similar en los diferentes tipos de secado ($\alpha < 0,05$). La madera utilizada en el secado de la estación seca fue extraída de un lote de plantación ubicado en Orotina, Alajuela, Costa Rica y las tablas fueron seleccionadas aleatoriamente de ese lote con el fin de no producir sesgos en la información referida al P.E. y al C.H.i y así no tener influencia en el secado. Para el caso de la madera utilizada en los secados de las estaciones de transición y lluviosa la madera es proveniente de Bananito, Limón Costa Rica e igualmente las piezas utilizadas fueron seleccionadas aleatoriamente dentro del lote de manera utilizada. Los valores promedios de P.E. y C.H.i para cada tipo de secado en las diferentes épocas del año logró confirmar que la madera utilizada tiene similares características para efectos de hacer la comparación entre estaciones.

Cuadro 3. Información general de las condiciones de secado de *Gmelina arborea* y sus principales resultados según los parámetros evaluados

Parámetros	Tipo de secado	Estación		
		Seca	Transición	Lluviosa
Peso Específico	Solar	0,38 (0,03) A	0,39 (0,03) A	0,41 (0,04) A
	Aire	0,43 (0,03) A	0,38 (0,03) A	0,44 (0,08) A
	Convencional	0,42 (0,08) A	0,42 (0,06) A	0,37 (0,06) A
C.H inicial (%)	Solar	150,06 (21,95) A	173,89 (27,21) A	158,51 (20,44) A
	Aire	109,07 (42,75) A	181,26 (20,85) A	140,71 (48,85) A
	Convencional	100,58 (5,91) A	144,19 (23,96) A	154,39 (23,08) A
C.H. Final (%)	Solar	11,96 (2,58) A	14,29 (3,49) A	10,90 (1,73) A
	Aire	25,87 (5,87) B	27,34 (6,91) B	40,14 (8,44) B
	Convencional	11,63 (6,07) A	9,80 (3,13) A	10,04 (4,27) A
Tiempo de secado (días)	Solar	56,46	96,91	83,45
	Aire	56,46	108,83	86,45
	Convencional	9,64	11,85	20,05
Tasa de secado (% / día)	Solar	2,45	1,65	1,77
	Aire	1,47	1,41	1,16
	Convencional	9,23	11,34	7,20

Los números entre paréntesis presentan la desviación estándar. Fueron utilizados en la estación seca 5 muestras en el S.S., 6 muestras el S.A. y 4 muestras en el S.C; en la estación de transición 6 muestras en los secados al aire y solar y 5 muestras en el S.C y en la estación lluviosa se utilizaron 5 muestras en el S.S y S.C y 4 muestras en el S.A, todas ellas para determinar estos parámetros.

A y B muestran las diferencias significativas ($\alpha = 0,05$)

Al finalizar el secado, los diferentes métodos producen un contenido de humedad final (C.H.f) que registran diferencias significativa ($\alpha < 0,05$). La madera en S.S. y S.C. en cualquier época del año

produce CHF menores a los que se logra en el S.A., teniendo la ventaja de que las humedades de la madera está entre el 10% y el 12% (Cuadro 3), esto también se debe a que las condiciones de temperatura y humedad relativa en el S.S. y S.C. son controladas para producir un CHE deseado aunque en S.S. no con la misma facilidad que en el S.C. En el caso del S.A., los C.H.f deberían estar en función de las condiciones meteorológicas imperantes en el sitio cuyas condiciones determinan en definitiva el contenido de humedad en equilibrio (CHE), para la zona de Cartago como ya se mencionó se producen un CHE de alrededor del 16% durante la estación seca y entre 18-20% en la estación lluviosa. Sin embargo, en este caso puede verse que se reportan C.H.f en el S.A. muy superiores al CHE de la región, en este caso la situación que se presentó es que la tasa de secado al aire fue definitivamente muy lento, de hecho aún cuando se superó el doble del tiempo utilizado en el secado de la *T. grandis*, aún así los contenidos de humedad de la madera no habían bajado lo suficiente para registrar un fin del proceso de secado.

La prueba se detuvo con el fin de no ocasionar un traslape entre las estaciones definidas para efectos de la aplicación de los tratamientos de esta investigación. Obsérvese en este caso que la tasa de secado (%/hrs) se mantiene muy similar en cualquier época del año en el secado al aire pero que en el secado solar ocurrieron variaciones importantes en esa tasa. Igualmente se observa que el tiempo de secado en las diferentes épocas del año es importante y diferente. Comparada con el secado de *T. grandis*, la *G. arborea* tarda un tiempo que es prácticamente el doble que el tiempo que se toma la *T. grandis* para secar.

En relación con la forma de secado en los diferentes métodos, también se justificó no hacerlo en un cuadro sino utilizando una curva de secado igual que como se hizo con *T. grandis*. Se obtuvieron resultados que indican que el S.C. tiene una pendiente alta pero como puede verse en la Figura 6, bastante constante, mientras que el secado solar tiene una pendiente más pronunciada que la curva de secado al aire pero bastante menos pronunciada que la secado convencional, esto mismo se puede ver cuando se reporta la tasa de secado diaria en los diferentes tipos de tratamiento (Cuadro 3).

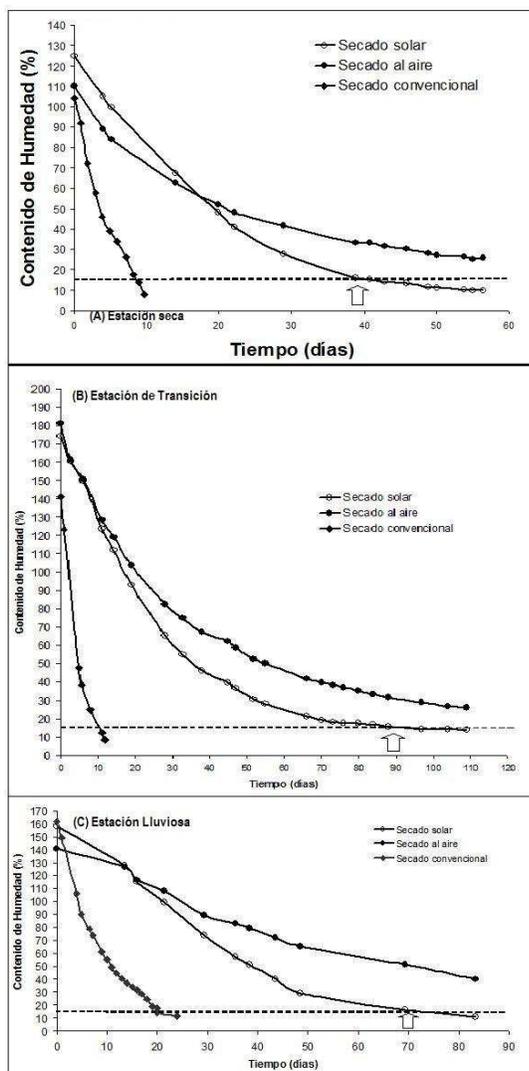


Figura 6. Variación del contenido de humedad de *Gmelina arborea* en secado al aire, secado solar y secado convencional en 3 diferentes épocas del año.

En el caso del secado solar y al aire empieza a ocurrir un cambio en la tasa de secado, después de los 30 días de iniciado el secado en la estación seca y alrededor de los 50 días en las estaciones lluviosa y de transición. Además, es importante hacer notar que cercano al 30% del contenido de humedad, esa pendiente de la curva cambia para el secado solar y el secado aire, explicado en buena parte porque debe aplicarse mayor esfuerzo energético en eliminar el agua atada, para continuar con el proceso de secado. La pendiente de la curva de secado tiene así dos cambios importantes uno cuando baja del 30% del CH en la madera y otro cuando llega al CHE que en caso de *G. arborea* este último se observa alrededor del día 40 de secado en la estación seca y después del día 70 en las estaciones de transición y lluviosa, en el caso del S.S., logrando obtener C.H.f adecuados para el trabajo posterior

de la madera. En el caso del S.A. aunque se observa la misma tendencia que en el S.S., es evidente que la cantidad de días necesaria es mayor para alcanzar el CHE.

5.3.2. Calidad del secado de la madera

-Calidad del secado de Tectona grandis

Los resultados de la calidad del secado de *Tectona grandis* se presentan en el Cuadro 4, la evaluación sobre presencia de defectos se hizo para diferentes muestras elegidas aleatoriamente antes y después del secado en las tres épocas del año y en los tres tipos de secado. En general de la madera de *T. grandis* de plantaciones de rápido crecimiento se puede decir que se registra un aumento en la cantidad y magnitud de las grietas y las rajaduras en todos los tipos de secado y en todas las épocas del año. La aparición del alabeo luego del secado se presenta en más del 50% de las piezas e incluso hay lotes de madera que se ven afectados hasta en un 92% por este defecto, en el secado solar en estación lluviosa. Sin embargo, la magnitud de este defecto es menor a 4,12 mm. La encorvadura es un defecto presente casi en la totalidad de la madera aserrada antes y después del secado, varía entre el 94 y el 100%. No obstante, aunque las encorvaduras estén presentes en la condición verde y seca, la magnitud varía. En la condición verde se observa que los valores promedio varían entre 10 mm y 15,5 mm, mientras que en la madera secada estas magnitudes se reducen ligeramente, variando de 8 mm y los 11 mm. La arqueadura es otro defecto de alta incidencia no solo en la madera verde, si no que también en la madera seca. Se presenta entre 83% y el 100% de las piezas de madera. La aparición del colapso después del secado no es un defecto común en esta especie, luego del secado solo apareció en un 5,56 % de las piezas y muy particularmente en el secado en horno convencional de la estación de transición.

Cuadro 4. Defectos en madera de *Tectona grandis* observados antes y después del secado en 3 diferentes épocas del año

Tipo de defecto	Condición	Seca			Transición			Lluviosa		
		Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional
Encorvadura (mm)	Antes	4,04 (100)	4,26 (100)	3,64 (97)	10,37 (100)	12,40 (94)	15,5 (91)	14,72 (100)	13,06 (97)	13,79 (97)
	Después	7,96 (97)	9,16 (97)	4,24 (100)	8,86 (89)	10,68 (97)	8,15 (94)	10,32 (15)	13,54 (94)	7,79 (97)
Arqueadura (mm)	Antes	13,97 (97)	13,0 (97)	12,05 (100)	3,9 (97)	3,85 (100)	3,07 (100)	2,45 (69)	2,88 (83)	3,46 (75)
	Después	4,37 (89)	2,01 (88)	6,04 (97)	4,52 (97)	4,01 (100)	3,25 (97)	6,79 (64)	3,58 (97)	5,56 (80)
Alabeo (mm)	Antes	9,97 (49)	3,03 (48)	2,80 (49)	2,59 (64)	2,88 (63)	3,09 (54)	1,62 (72)	3,21 (64)	4,39 (67)
	Después	4,13 (54)	1,93 (54)	3,82 (57)	2,88 (0)	3,22 (80)	3,94 (71)	4,12 (92)	3,69 (89)	3,90 (86)
Acanaladura (mm)	Antes	0 (0)	0 (0)	0,06 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	Después	3,21 (0)	0 (0)	0,45 (23)	0,93 (14)	0 (0)	1,63 (63)	1,62 (28)	0 (0)	2,38 (61)
Rajaduras (mm)***	Antes	- (41)	- (43)	- (48,57)	- (58)	- (40)	- (57)	- (56)	- (42)	- (53)
	Después	41,70 (53)	62,69 (54)	30,52 (40)	33,34 (53)	38,16 (57)	33,29 (54)	129,11 (47)	44,85 (47)	35,11 (50)

Tipo de defecto	Condición	Seca			Transición			Lluviosa		
		Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional
Grietas (mm)***	Antes	- (38)	- (37)	- (37)	- (33)	- (31)	- (34)	- (19)	- (28)	- (36)
	Después	54,19 (38)	42,32 (57)	11,53 (63)	89,84 (61)	161,87 (54)	96,74 (57)	151,09 (47)	59,23 (64)	122,88 (67)
Colapso(%)	Antes	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	Después	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (5,56)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

*** Incremento promedio en longitud entre la condición verde y seca

La magnitud de la encorvadura es más alta en lotes de madera de la época de transición y lluviosa que en la época seca.

La acanaladura no es un defecto que se observe antes del secado; sin embargo, siempre aparece después del secado en el S.C. y solo aparece en el S.S. de las estaciones lluviosa y de transición, como puede verse es un defecto de una muy baja magnitud.

En el cuadro 5 se presentan los resultados del un análisis de varianza del cambio en los defectos antes y después del secado. Se observa que el defecto de encorvadura cuando incrementa su magnitud, es significativamente diferente entre las piezas que se secan en el secado convencional y el secado solar, 2,07mm y 4,47 mm, respectivamente. Asimismo, en aquellas piezas en que la magnitud del defecto disminuye, la diferencia significativa se presenta pero en los secados al aire y solar. En todo caso la cantidad de piezas que disminuyen la magnitud de la encorvadura es mayor que las que lo aumentan. En el caso del defecto de arqueadura se encuentra que no hay una diferencia significativa entre los tratamientos pero sí es evidente que la cantidad de piezas que disminuyen el defecto es mayor que el que las aumenta. Tampoco se encuentra evidencia de diferencias significativas entre tratamientos para el defecto de alabeo. El defecto de acanaladura se presenta en su mayoría en el secado convencional y en algunas piezas del secado al aire, pero definitivamente no es un defecto que aparezca en el secado en horno solar.

Cuadro 5. Análisis de varianza de los defectos antes y después del secado de *Tectona grandis*

Defecto	Condición	Solar	Aire	Convencional
Encorvadura	Incremento N	4,47A 36	3,78AB 47	2,07B 34
	Decrecimiento N	-4,74AB 59	-3,70A 49	-5,27B 56
	Igual N	0 0	0 1	0 4
Arqueadura	Incremento N	2,09A 36	1,36A 40	2,12A 35
	Decrecimiento N	-4,33A 49	-4,39A 56	-4,56A 62
	Igual N	0 1	0 5	0 2
Alabeo	Incremento	2,33AB	1,84A	2,50B

<i>Defecto</i>	<i>Condición</i>	<i>Solar</i>	<i>Aire</i>	<i>Convencional</i>
	N	46	55	48
	Decrecimiento	-1,93A	-1,40A	-1,90A
	N	33	26	31
	Igual	0	0	0
	N	10	20	17
	Incremento	-	1,33A	1,56B
Acanaladura	N	-	18	45
	Decrecimiento	-	-	-
	N	0	0	0
	N	79	90	54

Con respecto a otros tipos de defectos como lo es la marca de separadores se indica que este defecto no se presentó en el secado de madera de *T. grandis*.

-Cambios en color por efecto del secado en madera aserrada de *Tectona grandis*

Otra información adicional que se recopiló de este proyecto corresponde con el análisis del cambio del color según el tipo de secado y la estación del año. Tal como se observa en la Figura 7, en el caso de *Tectona grandis* el cambio de color ΔE se encuentra en el rango de valor entre 2,5 y 5, para todas las estaciones del año, en este caso es importante notar que el cambio que genera realmente una diferencia significativa en los parámetros del color se evidencia sobre todo en la estación lluviosa, donde el color de la madera entre todos los tipos de secado tiene diferencias significativas.

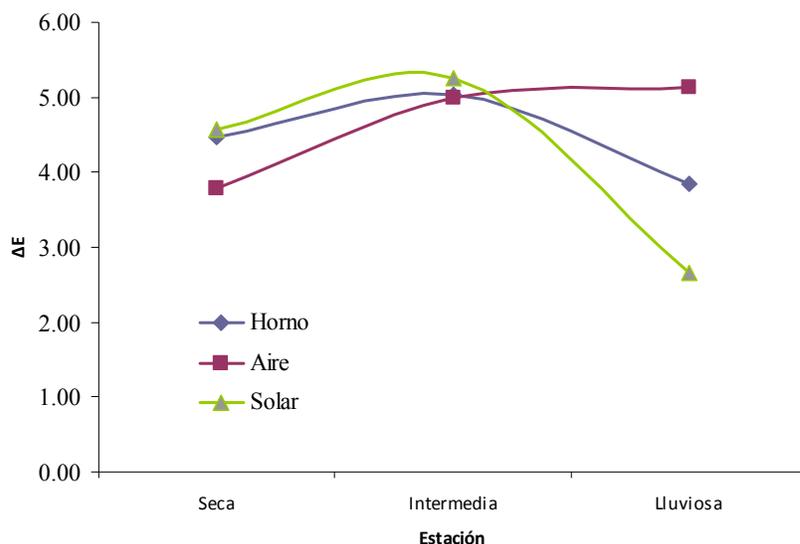


Figura 7. Cambio de color en las diferentes épocas del año para *Tectona grandis*

En términos generales se observa en los resultados que los componentes del color presentan sus diferencias significativas pero la combinación de estos es lo que genera el cambio en todos los tratamientos es sólo apreciable en la estación lluviosa, véase Cuadro 6.

Cuadro 6. Cambios en los componentes de color de *Tectona grandis* entre tratamientos, información brindada por estación analizada

Parámetro de color	Tipo de secado	Seca	Intermedia	Lluviosa
ΔE	Aire	3.8 A	4.99 A	5.14 A
	Horno	4.5 A	5.04 A	3.84 B
	Solar	4.6 A	5.26 A	2.65 C
ΔL	Aire	-1.27 B	0.82 B	3.41 A
	Horno	-3.65 A	-4.39 A	-2.65 B
	Solar	-3.13 A	-3.28 A	-0.94 C
Δa	Aire	0.06 A	-0.83 A	-0.41 A
	Horno	0.14 A	0.02 B	0.64 B
	Solar	1.20 B	1.67 C	0.00 B
Δb	Aire	1.82 A	2.93 A	3.15 B
	Horno	0.06 B	1.25 B	1.33 A
	Solar	1.86 A	2.15 A	1.69 A

-Calidad del secado de *Gmelina arborea*

Los resultados de la calidad del secado de *Gmelina arborea* se presentan en el Cuadro 7, la evaluación sobre presencia de defectos se hizo para diferentes muestras elegidas aleatoriamente antes y después del secado en las tres épocas del año y en los tres tipos de secado. En general de la madera de *G. arborea* de plantaciones de rápido crecimiento se puede decir que se registra un aumento en la magnitud de las grietas y las rajaduras en todos los tipos de secado con respecto a lo observado en la teca, pues las magnitudes de estos defectos en *T. grandis* son del orden de mm pero en *G. arborea* su magnitud es mayor debiéndose expresar en cm, esto se dio en todas las épocas del año. La aparición del alabeo antes del secado se presenta de forma variada en todas las estaciones, sin embargo se observa que su presencia en la estación lluviosa era prácticamente nula antes del secado y tuvo aparición superior al 60% de las piezas luego del secado en todos los tipos en magnitudes de 4,42 mm a 5,74 mm. La encorvadura es un defecto presente casi en la totalidad de la madera aserrada antes y después del secado, varía entre el 92 y el 100% en la estación seca. No obstante, aunque las encorvaduras estén presentes en la condición verde y seca, la magnitud varía. En la condición verde se observa que los valores promedio varían entre 3,24 mm y 5,07 mm, mientras que en la madera

secada estas magnitudes varían entre 2,37 mm y los 6,32 mm. La arqueadura es otro defecto de alta incidencia no solo en la madera verde, si no que también en la madera seca. Se presenta entre 77% y el 100% de las piezas de madera en condición verde y entre 86% y 100% de la madera seca. No apreció el colapso de piezas después del secado.

En el caso de la acanaladura puede observarse que es un defecto de poca aparición, nunca aparece en condición verde y su aparición luego del secado ocurre en estaciones lluviosa y de transición en todos los tipos de secado y solo en secado solar en la época seca. Cuando este defecto aparece la magnitud es de 0,99 mm y su mayor magnitud se alcanza en secado convencional con 4,64 mm.

Cuadro 7. Defectos en madera de *Gmelina arborea* observados antes y después del secado en 3 diferentes épocas del año

Tipo de defecto	Condición	Seca			Transición			Lluviosa		
		Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional	Solar	Aire	Convencional
Encorvadura (mm)	Antes	3,56 (97)	3,58 (100)	5,07 (97)	3,24 (57)	3,98 (93)	3,88 (100)	3,94 (70)	3,93 (77)	4,10 (90)
	Después	6,32 (100)	4,98 (97)	7,84 (92)	3,48 (67)	4,18 (77)	4,88 (91)	5,06 (63)	2,37 (80)	4,27 (70)
Arqueadura (mm)	Antes	9,73 (100)	16,10 (100)	20,09 (97)	14,81 (77)	14,10 (93)	10,48 (100)	5,06 (100)	16,45 (97)	12,64 (90)
	Después	7,35 (86)	11,36 (89)	17,35 (100)	10,17 (90)	15,48 (93)	9,43 (91)	13,13 (93)	13,95 (100)	6,76 (90)
Alabeo (mm)	Antes	1,35 (42)	1,40 (47)	1,56 (56)	2,42 (30)	2,83(43)	4,62 (18)	0 (0)	0 (0)	7,58 (3)
	Después	2,86 (53)	2,39 (33)	2,07 (39)	6,69 (13)	0 (0)	9,19 (64)	5,66 (83)	4,42 (73)	5,74 (67)
Acanaladura (mm)	Antes	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	Después	0,99(25)	0 (0)	0 (0)	1,86 (33)	2,0 (10)	4,39 (64)	1,84 (20)	1,16 (3)	1,60 (73)
Rajaduras (cm)***	Antes	- (28)	- (17)	- (19)	- (60)	- (67)	- (64)	- (43)	- (33)	1,46 (47)
	Después	13,60 (33)	11,76 (22)	38,03 (22)	17,91 (57)	18,56 (60)	16,8 (64)	14,49 (50)	15,61 (57)	1,73 (47)
Grietas (cm)***	Antes	- (33)	- (47)	(25)	- (43)	- (37)	- (36)	- (30)	- (27)	- (10)
	Después	5,65 (25)	5,51 (44)	77,96 (53)	24,77 (33)	23,0 (34)	9,57 (36)	7,35 (43)	5,04 (63)	2,23 (20)
Colapso(%)	Antes	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	Después	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	- (0)	0 (0)

*** Incremento promedio en longitud entre la condición verde y seca

En el cuadro 8 se presentan los resultados del un análisis de varianza del cambio en los defectos antes y después del secado de *G. arborea*. Se observa que no hay diferencias significativas del defecto de encorvadura cuando incrementa su magnitud en el S.S y el S.A, pero sí hay una diferencia significativa cuando se da S.C., 2,13 mm, 2,41 mm y 3,30 mm, respectivamente. Igualmente se presenta esta situación en aquellas piezas en que la magnitud del defecto disminuye, en este caso la diferencia significativa se presenta en el mismo sentido que cuando hay aumento del defecto pues no se dan diferencias significativas entre los secados al aire y solar pero sí con respecto al secado convencional. En todo caso la cantidad de piezas que aumenta la magnitud de la encorvadura es mayor que las que lo disminuyen el defecto.

En el caso del defecto de arqueadura se encuentra que no hay una diferencia significativa entre los tratamientos cuando el defecto aumenta pero sí hay diferencia significativa entre los tipos de secado cuando se observa la disminución del defecto, también es evidente que la cantidad de piezas que disminuyen el defecto es mayor que el que las aumenta.

Tampoco se encuentra evidencia de diferencias significativas entre tratamientos para el defecto de alabeo ni cuando aumenta el defecto ni cuando disminuye.

Cuadro 8. Análisis de varianza de los defectos antes y después del secado de *Gmelina arborea*

<i>Defecto</i>	<i>Condición</i>	<i>Aire</i>	<i>Solar</i>	<i>Horno</i>
Encorvadura	Incremento	2,41A	2,13A	3,30B
	N	47	53	45
	Decrecimiento	-2,08A	-1,91A	-2,07A
	N	39	31	29
	Igual	0	0	0
	N	10	12	3
Arqueadura	Incremento	4,27A	3,73A	2,72A
	N	38	36	27
	Decrecimiento	-4,50A	-8,28B	-7,92B
	N	58	60	49
	Igual	0	0	0
	N	0	0	1
Alabeo	Incremento	3,31A	4,70A	5,31A
	N	34	39	41
	Decrecimiento	-2,01A	-1,79A	-2,37A
	N	24	18	9
	Igual	0	0	0
	N	38	39	27
Acanaladura	Incremento	1,79A	1,85A	2,01A
	N	4	16	38
	Decrecimiento	-	-	-
	N	-	-	-
	Igual	0	0	0
	N	92	80	39

El defecto de acanaladura solo se presenta después del secado y su afectación es en poca proporción de las piezas, aunque no se registran diferencias significativas en la magnitud de la presencia del defecto entre tratamientos, sí es visible que la cantidad de piezas que lo presentan en el tratamiento de S.C. es el doble que la afectación a piezas en S.S. o en S.A., en todo caso es importante notar que una alta cantidad de piezas no presentan del todo este defecto.

Con respecto a otros tipos de defectos como lo es la marca de separadores se indica que este defecto no se presentó en el secado de madera de *G. arborea*.

-Cambios en color por efecto del secado en madera aserrada de *Gmelina arborea*

En el caso del análisis del color según el tipo de secado y la estación del año para la especie *Gmelina arborea* debe observarse que el cambio de color tiene una magnitud bastante diferente al parámetro

de color de la *T. grandis*. Tal como se observa en la Figura 8, en el caso de *G. arborea* el cambio de color ΔE se encuentra en el rango de valor entre 10,0 y 16,0, para todas las estaciones del año. Debe observarse también que el cambio de color no tiene diferencias significativas entre los tipos de secado y tampoco entre las diferentes estaciones del año.

Los resultados de esta etapa aún no se concluyentes falta en este caso realizar más comparaciones para tener resultados más explicativos.

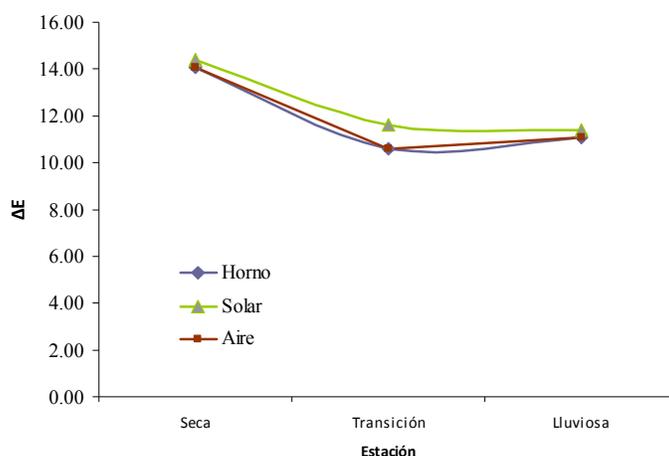


Figura 8. Cambio de color en las diferentes épocas del año para *Gmelina arborea*

También en este caso los resultados de esta etapa aún no son concluyentes pues falta en este caso realizar más comparaciones para tener resultados más explicativos.

-Otros elementos analizados en este proyecto.

Tanto para la especie *Tectona grandis* como *Gmelina arborea*, el proyecto ejecutó un análisis de extractivos, estos resultados aún continúan analizando en enero del 2011, razón por la cual sus resultados no se presentan en este informe. Esperamos que los resultados que se obtengan de esta evaluación de extractivos nos permitan poder concluir de una forma más acertada en relación con los cambios de color de la madera que se presentaron en ambas especies.

Difusión de resultados

La transferencia masiva de resultados de este proyecto no fue el objetivo primordial de la ejecución de proyectos aunque se reconoce que sobre la marcha y gracias a la publicación del manual de construcción de secadoras solares, los resultados fueron difundidos en actividades de difusión, un congreso y 2 artículos de revista

- 1) Se participó en el XIII Congreso Agropecuario y Forestal llevado a cabo los días 4, 5 y 6 de agosto del 2010, donde se presentó resultados parciales del uso de la secadores solares y su comparación con el secado en hornos convencionales y al aire, con la ponencia titulada “Uso de

Secadoras Solares en pequeña y mediana industria para el secado de madera aserrada de *Tectona grandis*, especie de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica” El resumen de esta ponencia se presenta en el anexo 2a de este informe.

- 2) Se escribió una nota técnica para la Revista Germinar ISSN 1659-1089, el título de la publicación es “Secadoras solares de madera aserrada” y salió publicada en la Edición No 2 del año 2010. Copia de este documento se presenta en el anexo 2b de este informe.
- 3) Se escribió un artículo informativo para la revista Investiga Tec ISSN:1659-3383, la publicación de este artículo se hará en el año 2011. Una copia del escrito enviado para la publicación se encuentra en el anexo 2c de este informe.
- 4) Se participó en una feria regional organizada por las secundarias de Zona Sur y en este evento de dos días que se llevó a cabo en el Colegio Técnico Profesional de Puerto Jiménez se expuso el prototipo a escala de la secadora solar y se entregó material informativo de este evento durante la exposición del mismo. Es importante señalar que este evento no solo fue dirigido a los estudiantes de secundaria sino a la comunidad regional. En la actividad principal participaron más de 25 personas, actividad que se llevó a cabo los días 5 y 6 de diciembre del 2009, fotografías del evento en el anexo 2d.
- 5) Se participó en la V Exporegional Golfito 2010 donde se llevaron resultados del proyecto Secadoras Solares de Madera Aserrada en pequeña y mediana industria. Celebrada los días 9 y 10 de abril del 2010, copia del certificado de participación en el anexo 2e.
- 6) Adicionalmente, gracias a la publicación de Manual de construcción de secadoras solares de madera que salió en el Volumen 5 Número 14 del año 2008 y que se lanzó en setiembre del 2009, muchas visitas individuales se han atendido de interesados en la construcción de secadores solares, las visitas individuales han permitido recibir a Asdrúbal Venegas, Rafael Ocampo y Flor Maroto y Carlos Vargas, todos ellos interesados en la construcción de secadores cuyo uso sería secado de madera. Adicionalmente 3 productores de cebolla de las zonas altas de Cartago se han mostrado interesados en el prototipo con el objetivo de secado de cebolla. En términos generales se indica que se recibe en promedio una persona por mes interesada en el prototipo de secadora.
- 7) Durante el año 2009 se construyó una secadora solar en condiciones similares a las de la construcción del ITCR en las instalaciones de la Ciudad de los Niños y dentro del marco del proyecto financiado por Fundecooperación y el ITCR que desarrolló el Ing. Alejandro Meza Montoya. La supervisión de la construcción y la capacitación sobre el uso del secador estuvo a cargo de este proyecto. La actividad de capacitación se llevó a cabo el 22 de setiembre del 2009.

- 8) Adicionalmente Luis A Vargas y Luis H González son representantes de la empresa nacional Inversiones TICUA Maderas de Plantación Río San Carlos y en el caso de ellos se está en proceso de concretar a través de la oficina de Vinculación Universidad Empresa, la venta de los derechos, sin exclusividad, para comercializar el prototipo de secadora solar, diseñado por el ITCR. Este negocio se encuentra en proceso y se espera concretar durante el año 2011. Sobre este particular se han tenido 3 reuniones formales con los interesados y el proceso de concretar el negocio continúa durante el año 2011. La venta sin exclusividad significa que podrían comercializar el horno pero que no serían los únicos que podrían hacerlo en caso que más estuvieran interesados.

6. Discusión

6.1. Eficiencia en la permanencia de la temperatura en la cámara solar y la evacuación de la humedad

6.1.1. Análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara:

La forma en que se resolvió efectuar el análisis del flujo de aire a lo interno de la cámara es un elemento meramente práctico y comprobativo de lo que sucede a lo interno de la cámara analizado básicamente con el objeto de efectuar cambios en caso necesario. Cuando se efectuó la inspección de la cámara y se revisó si había salidas de aire fuera de lo normal, era para comprobar únicamente si la temperatura se mantenía atrapada en el secador solar, sin que al mismo tiempo hubiera fuga en otro sector o sectores de la cámara y estuviera generando temperaturas internas muy similares a las externas. Si se encontraba una pérdida extraordinaria en el flujo de aire, esto repercutía en dos sentidos, primero en la temperatura interna de la cámara y segundo en la velocidad de paso del aire a través de la pila de madera que se seca. En este sentido los resultados demostraron que las pérdidas de calor eran normales es decir se encontró que cuando la temperatura externa baja, la temperatura interna también disminuye, aunque en una magnitud diferente, pues la temperatura dentro de la cámara como se verá en la sección siguiente siempre es más alta que la temperatura fuera de la cámara. El aporte hallado en el sentido del flujo del aire, que era el objeto de análisis, muestra una cámara con velocidades de flujo de aire estables.

En este sentido la literatura reporta que la velocidad promedio del aire a través de la pila de madera que se seca debe estar entre 1,0 m/s y 2,0 m/s, (Benitez y Calderón 1993:4). Si se tiene una velocidad más baja el secado no es eficiente y si la velocidad es más alta se pueden causar daños severos a la madera, como reventaduras e incluso grietas. La velocidad promedio encontrada en la cámara solar construido por el ITCR para el prototipo diseñado por el Ing Rafael Córdoba es de 1,5 m/s cumple con esta condición y en este sentido no se puede más que concluir que el diseño y la disposición de los abanicos, concernientes a este punto en particular del análisis, son los convenientes y por tanto no se requiere de un ajuste en la posición ni en la capacidad de los abanicos.

6.1.2. Temperatura y humedad dentro de la secadora:

El análisis de la temperatura y la humedad relativa dentro del secador solar se hizo con el objeto de comprobar si cambiando el color del secador o agregando sustancias desecantes era posible mejorar la eficiencia de la cámara en el tanto se permitiera lograr más temperatura o al menos mantenerla a lo interno por un tiempo mayor que el que se estaba obteniendo con los colores y las condiciones de secado con que se construyó el prototipo.

Sobre este aspecto en particular el informe del Ing. Del Valle es concluyente en el sentido de que los hallazgos demuestran que el uso de un color diferente en el secador propicia un aumento de temperatura interna, y a su vez el uso de sustancias desecantes potencia la captura de la humedad en la sustancia desecante propiciando una baja en la humedad relativa. No obstante que este hallazgo es real, el efecto sobre la operación normal del secador no es práctico pues a parte de que los cambios no son estadísticamente diferentes a los que en la realidad se dan, tampoco en la práctica añaden una ganancia significativa por su implementación. En este sentido aunque la sustancia desecante muestre utilidad en el corto plazo, como medio para atrapar la humedad contenida en el aire, su uso resulta impráctico puesto que la sustancia desecante no evacua fuera de la cámara esa humedad y por tanto una vez saturada la sustancia las condiciones climáticas vuelven a la normalidad, perdiendo su efectividad. En este sentido la prueba si bien demuestra su efecto, no demuestra su utilidad y por tanto la conclusión es que es más eficiente agregar un deshumidificador al sistema que además de añadir calor, extrae de la cámara la humedad del aire. Es importante agregar en este caso que el cambio de color no se descarta, y se deja como una recomendación para quienes construyen hornos solares. En términos del producto esperado, se puede concluir que la masa de aire interna se moviliza dentro de los rangos aceptables cuando se utiliza la cámara para el secado de madera aserrada y que la movilización de esa masa de aire a lo interno permite distribuir el calor atrapado en el colector de temperatura de una forma bastante homogénea.

También se concluye que no se detectaron pérdidas extraordinarias de calor en la cámara. Lográndose con el objetivo planteado en este proyecto de optimizar la eficiencia en el secado mejorando en caso necesario la distribución de la masa de aire dentro de la cámara de secado y evitando las pérdidas de calor hacia el exterior.

Sobre la magnitud de las temperaturas registradas a lo interno de la cámara, los resultados son concluyentes, se logran temperaturas que aunque varían a lo largo del día y del año son las más altas que se han registrado en secadores solares. Secadores solares utilizados en Estados Unidos han registrado temperaturas máximas diarias no superiores a los 40 °C,(N. H. Helwa; H. A. Khater; M. M. Enayet y M. I. Hashish, 2004) mientras que el secador solar instalado en el ITCR ha registrado temperatura máxima de 78 °C, durante la estación seca en el mes de marzo. Es obvio que estas temperaturas obtenidas en latitudes que superan el Trópico de Cáncer serán inferiores a las que se logran en latitudes tropicales. Comparando los resultados obtenidos observamos una concordancia con secadores solares que funcionan en México donde si se observa que se logran temperaturas máximas de hasta 45 °C en las épocas de verano, y las humedades relativas internas que van a depender en mucho de la humedad inicial de la carga de madera que se esté secando alcanzan el 90%, (Martínez-Pinillos Cueto, 1997) igual que como sucede en la cámara solar instalada en el ITCR.

La temperatura promedio alcanzada por el horno solar del ITCR, permite que los secados de la madera se den adecuadamente alcanzando durante el día y a lo largo de los días de secado una temperatura promedio de 30°C, óptimo y comparables o incluso mayores a las temperaturas que se han alcanzado en hornos solares instalados en México y Uruguay (Martínez, 1997 y Solís, 2003).

6.2. Automatización del registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado

Los resultados de esta sección muestran un producto no solo concreto, sino útil y tangible. El proyecto logró concretar un prototipo de control que permite al usuario tener un registro continuo y confiable de la temperatura y la humedad relativa interna y externa a la cámara. Este prototipo no solo mide los parámetros ambientales requeridos de humedad relativa y temperatura sino que además permite un registro manipulable y analizable en otros programas como Excel y Word o bien en programas estadísticos y graficadores de cualquier tipo.

Adicionalmente, el diseño del prototipo deja un programa visor de datos que al mismo tiempo grafica y permite ver detalles de los resultados en el gráfico mismo, pues permite el aumento visual (zoom) de los datos registrados.

El resultado más importante obtenido al incorporar este dispositivo al secador solar, es la independencia sobre la apertura y cierre de ventilas que el mismo dispositivo permite. Un secador solar que requiere de la apertura y cierre manual de las ventilas crea dependencia de un operario para atender este detalle sobre todo al inicio del procesos de secado. La incorporación de esta facilidad hace el sistema autónomo en este sentido, de tal suerte que el secador solar funciona solo en cuanto a la forma de suministro de temperatura y evacuación o no de la humedad de la cámara.

En este sentido, el objetivo de automatizar el registro de temperatura y humedad relativa interna y externa a la cámara de secado y las ventilas de intercambio de aire se logra completamente.

No obstante esta ganancia sobre la marcha y prueba del prototipo se logra determinar mejoras que aún se pueden añadir para dar mayor independencia al sistema. Una de estas mejoras al dispositivo es que la pantalla de visualización “LED” que tiene el prototipo permita ver en tiempo real la hora, la fecha y el resultado de la última lectura de Temperatura y Humedad Relativa registrada. La otra mejora que se le puede hacer es agregar una pila que permita que cuando hayan cortes eléctricos el sistema no pierda la configuración y por el contrario continúe el registro y que a su vez cuando la electricidad retorne, el sistema vuelva a depender de esta alimentación para continuar el registro. Finalmente, la otra mejora que se puede agregar es montar el circuito impreso contenido en una caja que aisle la temperatura superior a los 40 °C, sin que se dé un cambio de forma en el material que lo contiene. En un principio este aspecto no se previó como importante porque el dispositivo se ideó montarlo en las paredes externas de la cámara donde la influencia de la temperatura y humedad

externas son menores sobre el cambio dimensional del material que contiene el dispositivo, no obstante se comprobó que el vandalismo casual que ocurre en las cercanías de la instalaciones de la secadora solar del TEC, durante los fines de semana y días feriados ocasiona que el dispositivo esté expuesto a ser dañado como así ocurrió cuando estando aún adentro de la cámara intentaron sustraerlo y le dañaron el sensor de humedad externa. Razón por la cual ubicar el dispositivo a lo interno de la cámara es más seguro pero requiere de un cambio de la caja que lo resguarda. No se encontró en la literatura examinada que los secadores solares utilizarán dispositivos especialmente contruidos para esto y tampoco uno que controlara la apertura y cierre de ventilas, aunque se conoce que estos dispositivos son comunes de encontrarlos en funcionamiento en hornos convencionales.

Puede verse que el análisis de eficiencia que se ha hecho para el prototipo de secador solar del ITCR cumple con 3 parámetros, velocidad de la masa de aire, temperatura y humedad relativa. El análisis de eficiencia de un secador depende de estos 3 factores pues en definitiva, estos son los que propician que la madera se seque o no. En este sentido, en México a 20 ° latitud Norte, se ha reportado un secador solar que tiene 5 colectores de temperatura, todos internos, estos colectores aunque con características diferentes en su construcción, mantienen el principio de secado y la capacidad del horno es la misma que el utilizado en el horno del ITCR, el análisis hecho en este horno concuerda que las temperaturas promedios de los hornos al nivel de la pila de secado corresponden con temperaturas que oscilan en los 30 °C y que las temperaturas máximas podrían llegar a superar incluso los 80 °C (Solís et al 2003).

6.3. Caracterización del secado de madera de dos especies de plantación de rápido crecimiento

6.3.1. Tiempos de secado de madera aserrada y comportamiento de la velocidad del secado a lo largo del año utilizando diferentes métodos de secado

6.3.1.1. Secado de *Tectona grandis*, calidad del secado de su madera y cambios de color

Es importante indicar que los resultados de PE y Chi de la madera con que se trabajó para el presente estudio concuerdan con los reportados por Moya y Ureña, 2008; para esta especie. En el caso del C.H.f el resultado demuestra que en S.C se logran contenidos de humedad que rondan el 10%, y el hecho de mayor relevancia es que en el S.S. se logra obtener madera seca donde el C.H.f es estadísticamente igual a los que se obtienen en el horno convencional, este hecho se ha presentado en hornos solares contruidos en Estados Unidos y en México donde se han logrado obtener C.H.f similares a los reportados en este caso por N. H. Helwa; H. A. Khater; M. M. Enayet y M. I. Hashish, 2004 y Martínez-Pinillos Cueto, 1997.

Además, se observa de los resultados que obtener C.H.f inferiores al CHE es completamente factible en hornos solares, lo que representa una ventaja para el productor nacional con respecto a efectuar el

secado al aire libre, pues en término de 45 días se pueden lograr contenidos de humedad cercanos al CHE y muchas veces más bajos que este, ventaja que representa una ganancia en el tiempo de secado con respecto a las técnicas de secado a aire (Solís et al, 2003).

El tiempo de secado al aire de una madera cualquiera podría variar de 2 a 3 meses o de 1 a 2 meses dependiendo de la especie que se esté secando y de las dimensiones de la misma, y controlando las condiciones ambientales de un sitio de secado permite acelerar los tiempos de secado que se dan en la madera simplemente expuesta al aire, pero en todo caso ese control de ambiente debe asegurar a la vez que se mantiene con poca variación el cambio en defectos en madera producidos en el proceso de secado (Gan Kee Seng, 2000). Igualmente se ha podido comprobar que la estructura básica de los hornos solares ya permiten esa modificación de las condiciones ambientales y que como tal esa modificación logra bajar los tiempos de secado considerablemente (Solís et al 2003). Así los resultados muestran que la tasa de secado diario entre métodos de secado se da en una relación 1:2:4 para los secados convencionales, secados solares y secados al aire, respectivamente al menos en la estación seca. Este hallazgo significa una comprobación de lo que Martínez, 1997, encontró al efectuar secados de madera de pino en un secador solar ubicado en México que alcanzó estos resultados en esta misma época del año.

El comportamiento de secado que se ha obtenido no solo en el horno convencional sino también en el secado al aire y en el secado solar demuestra una vez más la utilidad de los hornos solares en países con abundancia de luz solar (Bond 2006).

Sobre la calidad del secado es importante señalar que Moya *et al*, 2008 en estudios previos reportan resultados de calidad de secado en S.C. y no en S.A. y S.S. En el caso de *T. grandis* se ha encontrado que la magnitud de los defectos en condición verde son similares a la magnitud de los defectos obtenidos en el presente estudio. Especies como el *Alnus acuminanta*, *Bombacopsis quinatum*, *Swetenia macrophylla* y la misma *T. grandis* han presentado el defecto de alabeo en más de 40% de las piezas (Moya et al, 2008) y la magnitud del defecto que se obtuvo en este estudio es similar al reportado por el mismo autor para este grupo de especies, pues en todas las estaciones del año este defecto se presentó luego del secado con una magnitud que varía entre 1,93 y 4,12 mm. Es importante señalar que cuando se realiza el análisis de información sobre los defectos se presenta el promedio pero en el lote de madera evaluado se ubican piezas que disminuyen el defecto y piezas que lo aumentan como reacción al proceso de secado. En este sentido es importante señalar que todos los tipos de secado desde el punto de vista del decrecimiento son estadísticamente iguales en cuanto a la presencia del defecto y que si usáramos la norma chilena NCH 993 para calificar la severidad del defecto de alabeo, tendríamos que clasificarlo como leve según lo reportado por Ananías, R; Salvo, L; Estrada, R y Briones R; 2008.

Moya et al, 2008 reporta, para el caso de arqueadura después del secado que en *T. grandis* puede llegar su magnitud a 6,04 mm para el secado en horno convencional, mientras que el presente estudio constata que esos promedios son inferiores para el S.A. y S.S. donde la magnitud promedio de la arqueaduras para la madera seca en 3 estaciones del año se registra en 3,2 mm y 4,44 mm, respectivamente, mientras que el promedio para el SC llega a 4,95 mm, en todo caso defectos clasificado como de leve a moderado por la misma norma Chilena ya citada.

En general sobre los diferentes defectos estudiados en el presente proyecto puede decirse que los resultados se encuentran dentro de los mismos márgenes que estudios como los de Moya et al 2008 y Ananías et al 2008 reportan para maderas de diferentes especies y lo importante en este caso es reconocer que la *T. grandis* es una especie de rápido crecimiento y que por tanto tal como lo indica Moya et al 2008, el incremento en los defectos podría estar asociado a la presencia de madera juvenil, la segregación genética de los árboles o al estrés producido durante el secado.

En relación con los cambios de color es importante anotar aquí que se ha evidenciado que en términos generales no hay un cambio de color significativo en el color entre los diferentes tipos de secado, excepto por lo ocurrido en la estación lluviosa, a este respecto es importante señalar que la tendencia de los colores en las 3 dimensiones que componen el color son diferentes, así por los resultados obtenidos podemos ver que la madera de *T. grandis* es una madera muy oscura pues el componente L es muy bajo, por su parte la dimensión a^* nos indica que el color de esta madera en términos generales es rojiza y finalmente el componente b^* del color nos lleva a colores tendientes al amarillento, esto nos lleva a determinar un color que puede definirse en términos generales como pardo oscuro, característico del *T. grandis*. No obstante este resultado, se conoce que la *T. grandis* cambia su color de verde a seco y que ese cambio podría estar explicado por la variación en extractivos, variaciones en el crecimiento o bien por diferencias en las propiedades del suelo donde crecen los árboles (Tovar et al 2009), debido a que los árboles de este estudio corresponden con un mismo sitio de estudio y una misma condición de manejo, serán los resultados de extractivos los que en definitiva puedan aportar algún tipo de explicación al respecto. Dado que los resultados de extraíbles para esta especie se terminan de procesar en el año 2011, se esperará a tenerlos para lograr resultados más concluyentes al respecto de estas variaciones. Un elemento que sí es importante señalar al respecto del cambio de color es que ciertos niveles de cambio de color son perceptibles o al menos apreciables (Cui et al 2004). De este hecho se puede concluir que los cambios ocurridos en el color de la *T. grandis* de la condición verde a la seca son apreciables al ojo humano pues se encuentran en el rango de cambio de 3 a 6, tal como lo reafirma Valverde et al 2010.

6.3.1.2. Secado de *Gmelina arborea* y calidad del secado de su madera

Al igual que en la *T. grandis*, en el secado de *G. arborea* se logra obtener C.H inferiores al CHE, razón que justifica el hecho de usar hornos solares en relación con secados al aire libre pues bajo esta última condición no es posible obtener esos niveles de secado (Fuentes-Salinas *et al* 2003).

Los resultados de PE y CHi de la madera con que se trabajó para el presente estudio de 0,40 en promedio para el PE y de 143% de CH, concuerdan con los reportados por Moya y Ureña, 2008; para esta especie. En el caso del C.H.f el resultado demuestra que en S.C se logran contenidos de humedad que están por debajo del 12%, y el hecho de mayor relevancia es que en el S.S. se logra obtener madera seca donde el C.H.f es estadísticamente igual a los que se obtienen en el horno convencional, nuevamente reafirmado no solo con los resultados de N. H. Helwa; H. A. Khater; M. M. Enayet y M. I. Hashish, 2004 y Martínez-Pinillos Cueto, 1997, sino por los resultados obtenidos por el presente estudio para la especie *T. grandis*.

Comparativamente con el caso de *T. grandis*, el secado de *G. arborea* resulta más lento, este hecho no es casualidad, precisamente la *G. arborea* experimenta secados más lentos debido a la formación de bolsas de humedad, (Moya y Muñoz 2008). Con respecto a la relación de secado en función del tiempo de esta especie en un horno solar no se puede concluir en definitiva sobre este aspecto aunque la tendencia obtenida muestra que la relación es diferente. Algunos estudios señalan que entre el secado en horno convencional y el secado al aire la relación es abismalmente diferente, pues mientras en el secado en horno una carga puede estar lista en máximo 17 días, (Muñoz y Berrocal , 2005) el S.A. puede demorar más de 8 meses.

En el caso de los S.S. y S.A. el tiempo de secado de esta especie fue muy amplio y aunque es visible que en un ambiente controlado como el del S.S. los contenidos de humedad se logran bajar del CHE, (Solís *et al* 2003) también es importante resaltar que las relaciones 1:2:4 entre S.C., S.S. y S.A., respectivamente; no se lograron obtener para esta especie ni siquiera en la estación seca. Se considera que dado que es una especie difícil de secar, más muestreos de este aspecto serían necesarios para llegar a resultados más concluyentes.

A pesar de esto, se reafirma en este caso que el comportamiento de secado que se ha obtenido no solo en el horno convencional sino también en el secado al aire y en el secado solar demuestra una vez más la utilidad de los hornos solares en países con abundancia de luz solar (Bond 2006).

Sobre la calidad del secado es importante señalar que Moya *et al*, 2008 en estudios previos reportan resultados de calidad de secado en S.C. y no en S.A. y S.S. En el caso de *G. arborea* se ha encontrado que la magnitud de los defectos en condición verde reportados por Moya *et al* 2008; son similares a la

magnitud de los defectos obtenidos en el presente estudio. Especies como el *Alnus acuminanta*, *Bombacopsis quinatum*, *Swetenia macrophylla* y la misma *T. grandis* han presentado el defecto de alabeo en más de 40% de las piezas (Moya et al, 2008).

Como ya se dijo, para el caso de *T. grandis*, también para el caso de *G. arborea*, cuando se realiza el análisis de información sobre los defectos se presenta un promedio, pero en el lote de madera evaluado se ubican piezas que disminuyen el defecto y piezas que lo aumentan como reacción al proceso de secado, en este sentido es importante señalar que todos los tipos de secado desde el punto de vista del decrecimiento, dan diferencia estadísticamente en cuanto a la presencia del defecto de arqueadura.

Moya et al, 2008 reporta, para el caso de arqueadura después del secado *G. arborea* que este defecto puede alcanzar una magnitud a 6,23 mm para el secado en horno convencional, mientras que el presente estudio se obtuvo por el contrario que tanto en el S.C. como en el S.A. y S.S. esos promedios tienen magnitudes muy superiores a este valor.

En general sobre los otros defectos estudiados en el presente proyecto puede decirse que los resultados se encuentran dentro de los mismos márgenes que estudios como los de Moya et al 2008 y Ananías et al 2008 reportan para maderas de diferentes especies excepto para el caso de la arqueadura, pero en todo caso es importante reconocer que la *G. arborea* también es una especie de rápido crecimiento y que por tanto, tal como lo indica Moya et al 2008, el incremento en los defectos podría estar asociado a la presencia de madera juvenil, la segregación genética de los árboles o al estrés producido durante el secado.

Las magnitudes de defectos como arqueadura, rajaduras y grietas, posteriores al secado están también en función de la condición en verde de partida, pues si los defectos en condición verde son elevados igualmente los defectos en condición seca lo serán.

Se conoce que la *G. arborea* cambia su color de verde a seco y que ese cambio podría estar explicado por la variación en extractivos, variaciones en el crecimiento o bien por diferencias en las propiedades del suelo donde crecen los árboles (Tovar et al 2009). En este caso los árboles del estudio corresponden con dos procedencias diferentes y por ende también dos condiciones de manejo diferentes, y en este sentido los resultados de extractivos podrán aportarnos alguna conclusión que eventualmente no será definitiva hasta tanto no se incorporen las variables del sitio y manejo. En todo caso, dado que los resultados de extraíbles para esta especie se terminan de procesar en el año 2011, se esperará a tenerlos para lograr resultados más concluyentes al respecto de estas variaciones. Un elemento que sí es importante señalar al respecto del cambio de color es que ciertos niveles de cambio de color son perceptibles o al menos apreciables (Cui et al 2004). De este hecho se puede

concluir que los cambios ocurridos en el color de la *G. arborea* de la condición verde a la seca son perceptibles al ojo humano pues se encuentran en el rango de cambio de 10 a 14, tal como lo refiere Valverde et al 2010.

7. Conclusiones

1. El diseño y la disposición de los abanicos, son los apropiados para esta infraestructura y por tanto no se requiere de un ajuste en la posición ni en la capacidad de los abanicos.
2. La Secadora solar tiene un flujo de aire óptimo que oscila entre 1 m/s y 2 m/s, adecuado para asegurar el paso constante de aire a través de la pila de secado y óptimo para asegurar que los defectos del secado no serán mayores que los propios de todo proceso de secado
3. La cámara de secado solar no tiene fugas importantes de temperatura hacia el exterior de la cámara, su comportamiento de variación en las temperaturas son las normales para este tipo de cámara de secado.
4. No hay efectos significativos en el cambio de color de la estructura del secador solar ni en el agregado de sustancias desecantes que garanticen un cambio positivo en las condiciones climáticas internas de la secadora solar, razón por la cual no es necesario producir cambios en este sentido.
5. Se construyó un prototipo de registrador electrónico de la temperatura y humedad relativa interna a la cámara que permite con independencia obtener un registro confiable de las condiciones ambientales de la misma. Este registro permite adicionalmente que el sistema programado dé autonomía a la cámara en la apertura y cierre de las ventilas de la secadora. Los resultados de esta etapa involucran la existencia del diagrama electrónico del dispositivo, el prototipo de almacenamiento y control, la interfaz gráfica de programación y acceso de datos y el manual de usuario.
6. La temperatura promedio alcanzada por el horno solar del ITCR, permite que los secados de la madera se den adecuadamente alcanzando durante el día y a lo largo de los días de secado con una temperatura promedio de 30°C.
7. El secado solar garantiza la obtención de contenidos de humedad final en la madera que son inferiores al contenido de humedad en equilibrio, razón que justifica la utilización de estos mecanismos de secado en relación con los secados al aire. Tanto en el secado de madera de *Tectona grandis* como en el secado de *Gmelina arborea* los contenidos de humedad final alcanzan valores prácticos iguales a lo que se obtienen en hornos convencionales.
8. Las relaciones de tiempo en el secado de *Tectona grandis* cumplen la condición de 1:2:4 entre el secado convencional, secado solar y secado al aire respectivamente. La ganancia en tiempo de secado es importante desde el punto de vista productivo. En el caso de *Gmelina arborea* esta

relación de tiempo definitivamente no es igual, y al parecer es mayor, en parte atribuible a la formación de bolsas de humedad en la madera manteniendo los niveles de secado en pasos constantes pero más lentos. Falta muestrear más este proceso para tener resultados concluyentes.

9. Para el productor nacional secar madera en un horno solar y obtener contenidos de humedad final en la madera que están alrededor del 10% y que son los adecuados para el trabajo posterior de la madera representa un ventaja comparativa con respecto al secado al aire libre, por el tiempo que se dura y en términos de costos la ventaja se da frente al horno convencional pues en término de 45 días se pueden lograr contenidos de humedad cercados al CHE y muchas veces más bajos que este a un costo muchísimo menor.
10. En cuando a la presencia de defectos en la madera, se encontró que los resultados obtenidos en términos generales no son diferentes a los reportados en otros estudios. Pero sí es importante reconocer que se presentan variaciones en los resultados de defectos después del secado en los diferentes tipos de secado y que estas variaciones son atribuibles tanto al tipo de secado. Su magnitud por el contrario ha de estar asociada más a la magnitud que tienen en condición verde y no tanto al tipo de secado.
11. Se ha comprobado cambios apreciables en el caso del color en *Tectona grandis* y perceptibles en el caso de *Gmelina arborea*, queda pendiente que se analicen los resultados de extractivos para tener resultados más concluyentes.
12. Se logra el contacto para que el ITCR venda los derechos de construcción del prototipo a una empresa privada que se encargaría de la comercialización del mismo, este negocio se encuentra en proceso.

8. Recomendaciones

- 1) Para utilizar sustancias desecantes que aseguren un buen rendimiento en la captura de la humedad, es necesario tener el desecante con buena capacidad de absorción en el momento de mayor eficiencia del secador, en este momento esa sustancia desecante no se encontró pero podría ser que en el futuro se tenga una.
- 2) En el caso de que se decida pintar la estructura del secador solar, se debe procurar un color negro mate e intenso, así las condiciones de absorción de energía radiante serán mejores.
- 3) Para un uso continuo, al sistema de secado solar se le pueden incorporar adiciones de calor, sea por energía eléctrica o por energía química para lograr tiempos menores de secado, estos sistemas deben ser programados para que su funcionamiento se detenga en el momento que inicia el periodo de mayor eficiencia del secador y se enciendan al acabar éste último, siguiendo el mismo principio de transferencia de calor con que inicialmente se diseñó el secador solar.
- 4) Se pueden efectuar mejorar en el equipo de registro de datos de temperatura y humedad relativa estas mejoras sugeridas son :
 - i) Que la pantalla de visualización LED que tiene el prototipo permita ver en tiempo real la hora, la fecha y el resultado de la última lectura de Temperatura y Humedad Relativa registrada.
 - ii) Que se le agregue una pila que permita que cuando hayan cortes eléctricos el sistema no pierda la configuración y por el contrario continúe el registro y que a su vez cuando la electricidad retorne, el sistema vuelva a depender de esta alimentación para continuar el registro.
 - iii) Montar el circuito impreso contenido en una caja que aisle la temperatura superior a los 40 °C, sin que se dé un cambio de forma en el material que lo contiene.

9. Agradecimientos

- ✓ Se hace un agradecimiento particular a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR por el contenido económico brindado durante los años 2009 y 2010 para la ejecución de este proyecto de investigación.
- ✓ Un agradecimiento muy especial para la empresa Junquillal S.A. en la persona de los señores Luis Fonseca, administrador de finca, y Pablo Gordienko accionista de la empresa, quienes durante el año 2009 nos brindaron 3 viajes de madera de *Tectona grandis* y 1 viaje de *Gmelina arborea*, para realizar las pruebas con estas especies. Ellos asumieron el costo de traslado ida y vuelta de la madera y por tanto sus aportes no efectivos se han estimado en la suma de ¢1,600 000,00.
- ✓ Un agradecimiento muy especial también para la empresa Maderas Cartago S.A, en la persona del señor de Jorge Brenes quien es el Gerente y de Gaudy Solano quien es la asistente de gerencia, ellos dieron la condiciones logísticas y materiales también para 2 viajes de madera de *Gmelina arborea*, para concretar las pruebas de estas especie durante el año 2010. Ellos también asumieron el costo del traslado de ida y regreso de la madera y por tanto sus aportes no efectivos se han estimado en la suma de ¢264 000,00.
- ✓ También se deja expreso el agradecimiento a los señores Rodrigo Viquez Vega, José María Jiménez Quesada, Carlos Olivares, José Córdoba, Juan Quirós y Rodrigo Quesada por el apoyo de tipo logístico brindado durante la realización de las pruebas y a los ingenieros Rafael Córdoba Foglia y Diego Camacho Cornejo por el apoyo en la recopilación de datos y la guía técnica.
- ✓ Se agradece también al estudiante Pedro Gonzáles Sicard quien colaboró con la toma de información de campo durante el año 2010.

10. Referencias

- (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. Wood Fiber Science 36: 291-301
- Ananías, R; Salvo, L; Estrada,R y Briones R; 2008. Estudio Experimental del Secado a temperaturas convencionales de acacias. Maderas. Ciencia y Tecnología 10(2):151-162.
- Benítez, R y Calderón, A. 1993. Secador Solar para Madera. 1 era ed. CEMAPIF y CUPROFOR, Honduras, 23 p
- Bériz, L. 2003. Secador Solar de Madera. Energía y Tú. Cuba Solar. (24) ISSN 1028 9925. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo02.htm>
- Bond, B. 2006. Design and operation of a solar-heated dry kiln. Publication Number 420-030. Blacksburg, VA: Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Tech, Virginia Cooperative Extension.
- Cui, W.; Kamdem, P.; Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy
- Delgado, C.; Leiva, G.; Bériz, L. 2005. Familia de secadores solares SecSol. Energía y Tú. Cuba Solar. (30) ISSN 1028 9925. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia30/HTML/articulo02.htm>.
- Fernández-Golfín, J. 1998. Manual de secado de Madera. AITIM, España. Gráficas Palermo, S.L. p 47-95.
- Fuentes-Salinas,M.; Luna-Sánchez, D.; Osorio-Suárez, J.;Corona-Islas, J. 2003. Revista Champingo
- Fuentes-Salinas,M.; Luna-Sánchez, D.; Osorio-Suárez, J.;Corona-Islas, J. 2003. Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 9(2): 171 - 176.
- Gan Kee Seng, 2000. Book chapter V Solar drying of timber; Conference paper. Conference on forestry and forest products research: proceedings of the fourth conference, Forest Research Institute Malaysia, 2-4 October 1997 2000 pp. 345-352
- Helwa, N et al. Experimental Evaluation of Solar Kiln for Drying Wood In Drying Technology An Internacional Journal. (en línea), vol. 22 No. 4. Consultado el 22 de agosto del 2007. Disponible en:
<http://www.informaworld.com/smpp/432725900-51705737/title~content=g713628631~db=jour>
- http://www.itacab.org/desarrollo/documentos/fichas_tecnologicas/ficha73.htm

- http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/antiores/antior4/pdf/Articulo%201.pdf
- ITACAB. 2004. Secador Solar para madera. Ficha 73. (en línea). Consultado 21 de mayo del 2007. Disponible en:
- IUFRO, 1992. Proceedings of All-division 5 “Forest Products” International Union of Forestry Research Organizations conference; August 23–28; Nancy, France. 497-507.
- Junta de Acuerdo de Cartagena. 1989. Manual del Grupo Andino para el Secado de Madera. JUNAC 1era edición. Carvajal S.A. Colombia. Pág- 3-95.
- Martínez-Pinillos-Cueto, E. 1997. Diseño y ensayo de un secador solar para madera. (en línea) Madera y Bosques 3(2):13-28. Consultado 21 de mayo del 2007. Disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumeness/3.2/pdf/Martinez%25201997.PDF>
- Moreno M, G. Manual de Construcción y Operación de una secadora solar (en línea). Seminario de Proyectos II, Ing. en Energía, UAM-I. Consultado 21 de mayo del 2007. Disponible en: http://www.cbi.izt.uam.mx/iph/archivos_profesores/50/archivos/4f197.pdf
- Moya, R.; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried Gmelina arborea lumber. Journal of Tropical Forest Science 20(1): 48-56.
- Moya, R.; Urueña, E; Salas, C.; Muñoz, F. 2008. Modulation of moisture content in conventional kiln of wood from fast-growing tropical species in plantation. CD. SWST, L. (ed). Proceedings SWST Annual Meeting. 10-12 de noviembre de 2008. Concepción – Chile.
- Muñoz, F.; Berrocal, A. 2005 Secado experimental de Gmelina arborea Roxb. proveniente de la Zona Atlántica de Costa Rica. Revista Kurú 2(4)Nº 31: 21-25. Consultado 11 de diciembre del 2010. Disponible en:
- Sánchez Miño, S. 2003. Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones.(en línea) Consultado en http://www.uni-oldenburg.de/ppre/download/Downloads/ENERG%CDAS_RENOVABLES.pdf
- Solís, L.; Cerón, M.; González, I. 2003. Diseño y Operación de una estufa solar para secar madera. (en línea) Ingeniería 7(3):35-48. Consultado 16 de diciembre del 2010. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=46770304>
- Tovar, D.; Moya, R.; Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. Maderas. Ciencia y Tecnología 11(3): 207-216.

- Tschernitz, John L.; Simpson, William T. 1985. FPL design for lumber dry kiln using solar/wood energy in tropical latitudes. Gen. Tech. Rep. PL-44. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 17 p.
- Valverde, J.; Mora, R. 2010. Efectos de la intemperie en el color de dos acabados aplicados en madera de *Cedrela odorata* y *Carapa guianensis*. Maderas. Ciencia y Tecnología 12(3): 171-180.
- WordWeb. 2006. Solar Kiln Designs 4 -- Solar Heated, Lumber Dry Kiln Designs - Part 4 (en línea). Consultado en http://www.woodweb.com/knowledge_base/Solar_Kiln_Designs_4.html

11. Anexos

Anexo 1.

Manual de Usuario del Data Logger *En el documento en digital este anexo es un archivo separado*

Manual de Operación

Uso del prototipo de hardware

Primeramente es debido realizar una pequeña descripción del hardware del dispositivo de toma de mediciones. Para tal efecto se muestra un diagrama general en la figura 1, que hace una explicación visual de cada elemento que compone el diseño.

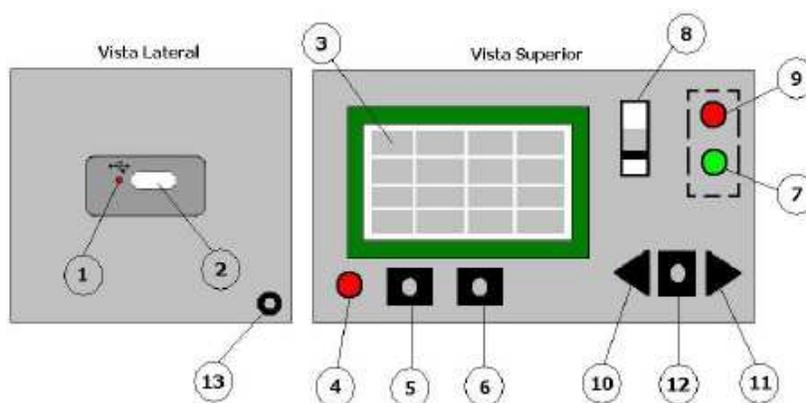


Figura 1 Diagrama de descripción del hardware.

En la tabla 1 se muestra el detalle de cada parte del hardware:

Tabla 1 Descripción del hardware.

Número	Descripción
1	Led indicador de la interfaz USB
2	Puerto USB tipo A
3	Pantalla LCD 4x16
4	Luz de encendido
5	Botón de reset
6	Salir de toma de medición
7	Led Indicador de salir
8	Modo de apertura
9	Led Indicador de apertura de ventilas
10	Bajar
11	Subir
12	Seleccionar
13	Entrada de alimentación

Arranque del sistema

Una vez que el prototipo es alimentado, el led indicador del punto 4 (figura 1), se enciende. En la pantalla LCD se muestra el mensaje: **"Reloj Tiempo Real:" "Conf. Hora-Fecha"**.

Configuración de hora y fecha

Una vez mostrado el mensaje inicial, la pantalla muestra paso a paso los siguientes mensajes:

Configurar Fecha:

"Fecha: 01-31"

"Fecha: 01"

El dispositivo está en espera de introducir la fecha. Por lo tanto con los botones de Subir o Bajar (10 y 11 de la figura 1) se puede escoger el valor de la fecha específica. Una vez llegado al valor de la fecha, se procede a pulsar el botón Seleccionar.

Del mismo modo (tal y como se muestra en la tabla 2) se introducen uno a uno los otros parámetros de hora y fecha, y al pulsar Seleccionar se cambia al siguiente parámetro por configurar:

Tabla 2 Mensajes de configuración de hora y fecha.

Configuración	Mensajes en el LCD
Mes	"Mes: 01-12" "Mes: 01"
Año	"Año: 00-99" "Año: 00"
Hora	"Hora: 00-23" "Hora: 00"
Minutos	"Minutos: 00-59" "Minutos: 00"
Día de la semana	"Día de la semana" "Domingo"

Configuración de tiempo entre mediciones

Ya configurada la hora y fecha, se procede a mostrar un mensaje en el LCD para configuración de los tiempos entre toma de mediciones. De igual modo se muestra:

"Tiempo: 01-59"
"Tiempo: 1"

Con los botones de subir, bajar y seleccionar se da configuración a esta parte del proceso. Es posible seleccionar mediciones desde cada minuto, hasta cada 59 minutos.

Seguidamente el sistema muestra un mensaje en espera de que el usuario introduzca la memoria:

"INTRODUZCA USB"

Una vez que se introduce el dispositivo externo de memoria, el sistema inicializa y empieza el proceso de toma de mediciones.

Cada vez que se realiza una nueva toma de datos, y los mismos son escritos en la llave maya, se escribe en el LCD un mensaje **"ESCRIBIENDO"** como guía para saber que las escrituras están siendo realizadas.

Salir de la toma de mediciones

Desde el momento en que se configuran los tiempos entre toma de mediciones, el sistema inicia la toma de datos continuamente hasta que el usuario decida que el proceso finalice. La manera de indicar al sistema, que el proceso de mediciones ha finalizado, es mediante el botón de salir de toma de medición (punto 6 de la figura 1).

Al pulsar éste botón, el led indicador de salir (7 de la figura 1), se enciende y apaga nuevamente, indicando al usuario que el sistema fue interrumpido. Al hacer esto, se procede a mostrar en la pantalla LCD un mensaje:

"RETIRE DISP."

Al retirarlo el sistema vuelve nuevamente a la pantalla de configuración de tiempo entre mediciones, en espera de un nuevo valor de tiempo entre las mismas, para dar inicio nuevamente al proceso de toma de variables.

Modo de apertura

Si observamos el led rojo (9 de la figura 1), se llevará el control de apertura o cierre de ventilas del secador. Si el mismo se encuentra encendido, la ventila estará abierta, y de lo contrario cerrada.

Esta señal se encenderá (cuando se den las condiciones adecuadas) únicamente si el selector de apertura manual o automático se encuentra apagado. Dicho interruptor corresponde al número 8 de la figura 1. Por el contrario si el interruptor es activado, se estará en modo manual de apertura de ventilas, y la señal nunca se encenderá.

Capacidad de almacenamiento de datos

Al utilizarse una memoria externa tipo USB, la capacidad de almacenamiento de información es muy grande. Los archivos de texto generados por el dispositivo son de muy pequeño tamaño por lo que se podría almacenar gran cantidad de procesos de medición en una llave maya de 1 GB por ejemplo.

Para establecer un tamaño máximo del archivo de texto generado en un proceso de 70 días de secado y medición continua se presenta el siguiente cálculo:

Suponiendo mediciones cada minuto durante setenta días de medición, el archivo generado tendría 100800 líneas de texto con información. El tamaño de un archivo con el formato compatible para la interfaz humano/máquina de tabulación, y que posee esa cantidad de líneas de texto, es de 3.65 MB. Hasta 280 archivos de texto distintos de dicho tamaño, podrían ser almacenados en una memoria flash de 1 GB.

Cambios al software del microcontrolador

Si se desean hacer futuros cambios al programa de manejo del microcontrolador interno del prototipo de toma de mediciones, se debe hacer uso del Compilador CCS C Compiler, mas conocido como Compilador PIC-C (**PCWH Compiler Version 4.049**).

El código fuente se encuentra en el archivo de nombre **VDRIVE2.C** así que para modificaciones se debe escribir nuevas rutinas en el mismo.

Uso de la interfaz humano/máquina

Cada una de las ventanas que se implementan en la unidad de visualización, cuentan con suficiente información con la finalidad de que el manejo de la interfaz se haga lo mas sencilla y amigable posible.

La idea de esta interfaz, es tabular y graficar los datos medidos previamente por los sensores de humedad y temperatura, tanto a lo interno como a lo externo del secador solar para madera. Los datos se encuentran en un archivo de texto de formato específico, creado por la interfaz de hardware diseñada.

Pantalla principal

La pantalla principal de la figura 2, está diseñada con el fin de mostrar al usuario, todas las capacidades de la aplicación. Los botones poseen el nombre exacto de la actividad que realizan.

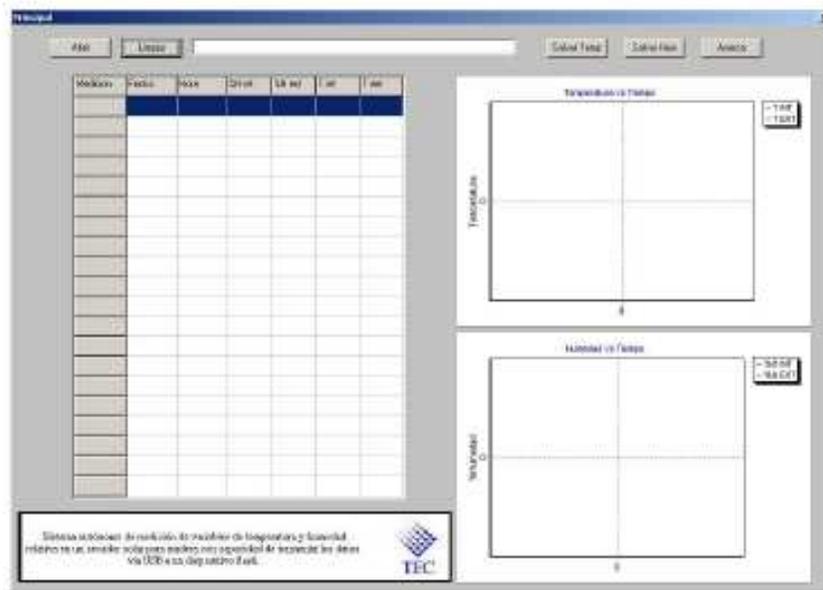


Figura 2 Pantalla principal de la interfaz de usuario.

Acerca

La pantalla de la figura 3, cumple con la función de mostrar los créditos, es decir la información general, nombre del proyecto y por quien fue implementado al pulsar el botón con ese nombre.



Figura 3 Información general.

De una manera muy sencilla se puede regresar a la pantalla principal de la aplicación, al pulsar el botón con ese nombre.

Abrir archivo

El primer paso es abrir un archivo de mediciones previamente guardado, tal y como se muestra en la figura 4. Para tal efecto se procede a pulsar el botón Abrir y seleccionar el mismo.

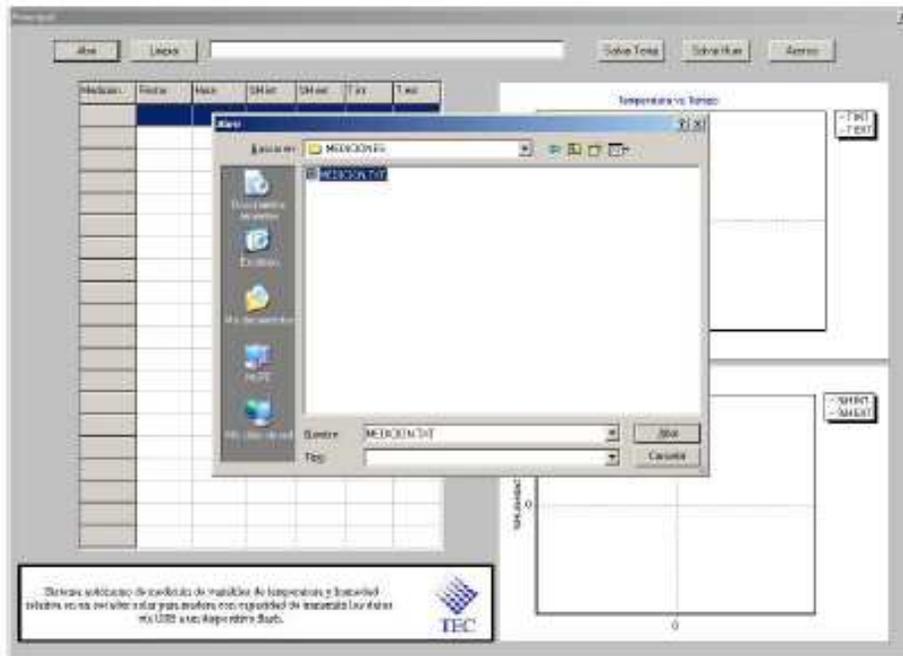


Figura 4. Abrir el archivo de texto.

Archivo incompatible

Cuando se desea abrir un archivo, si la extensión o el contenido del mismo no son compatibles con las que la interfaz debe analizar previamente a su apertura, el programa principal muestra un error de archivo incompatible, como el de la figura 5.



Figura 5 Leyenda de archivo incompatible.

Una vez seleccionado un archivo correcto, los datos son cargados por el programa, distribuidos correctamente en la tabla de la pantalla principal, y por consiguiente graficados, tal como se muestra en la figura 6.

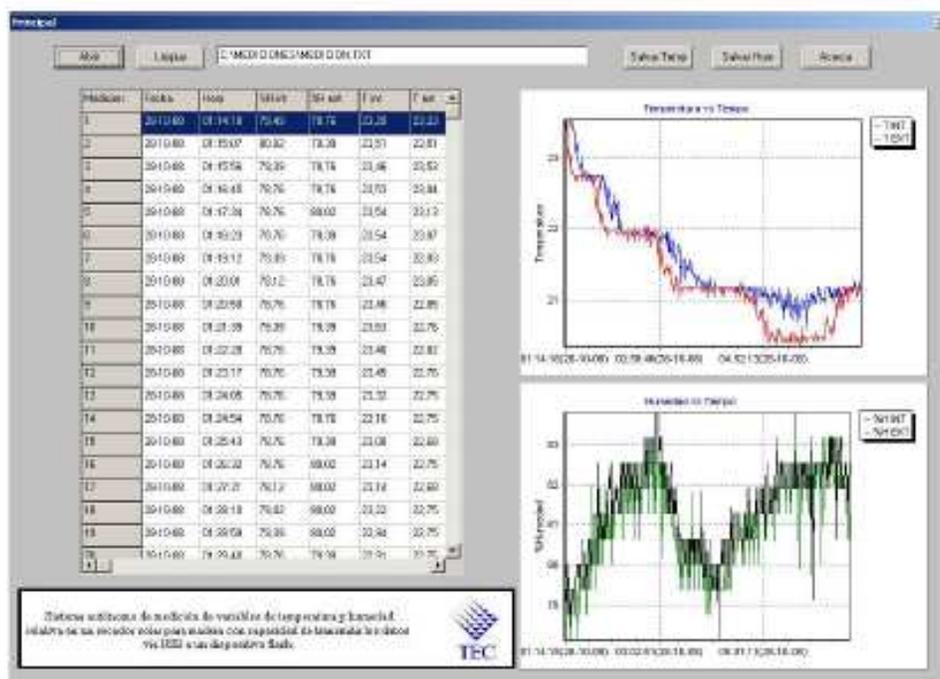


Figura 6 Tabulación y graficas de la información del archivo.

Teniendo los datos cargados, tabulados y graficados, se puede tener acción sobre los dos gráficos. Haciendo clic con el mouse, sobre el área que se desea detallar o agrandar el cualquiera de los gráficos, y arrastrando el mismo hacia la derecha, se puede dar zoom a las gráficas. (Figura 7)

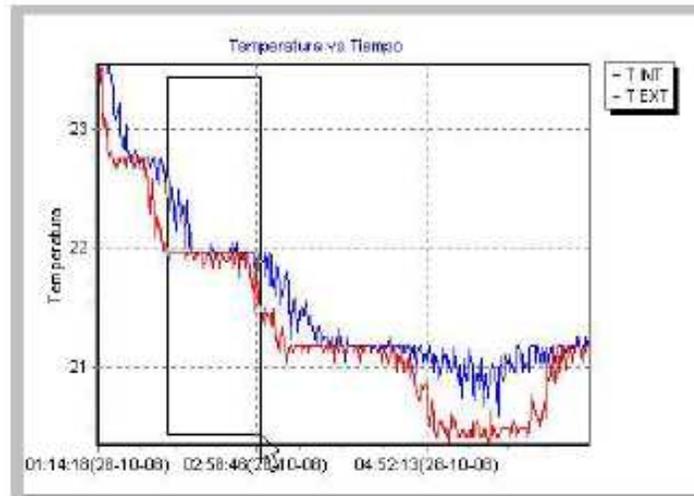


Figura 7 Acercar las mediciones.

Como lo muestra la figura 8, se tendrá una mejor visión de los datos del gráfico.

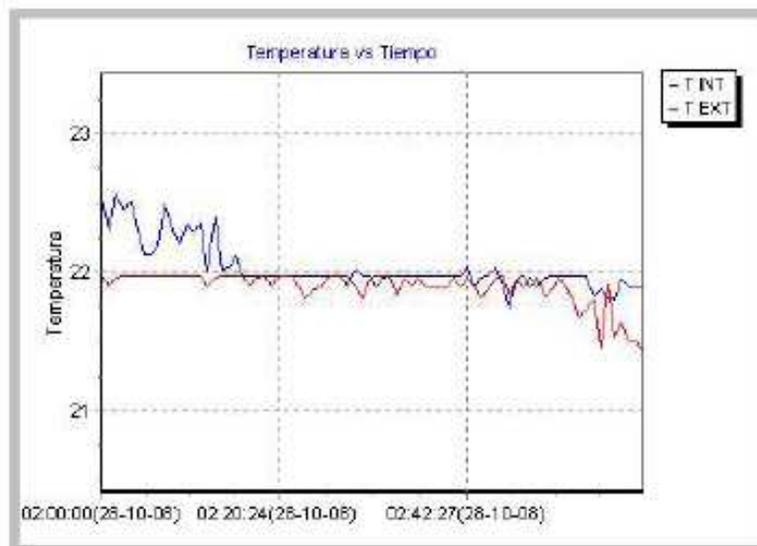


Figura 8 Acercar el rango de medición.

Pero si se desea ver el gráfico completo más grande (figura 9), se procede a pulsar sobre la leyenda de la derecha, al lado superior:

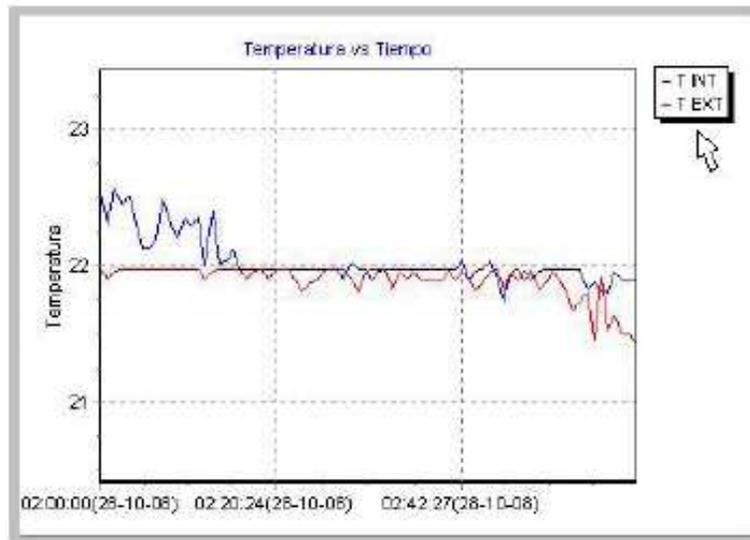


Figura 9 Aumento de área de graficación.

El gráfico se hace del tamaño de la pantalla para un mejor manejo de los datos (ver figura 10).

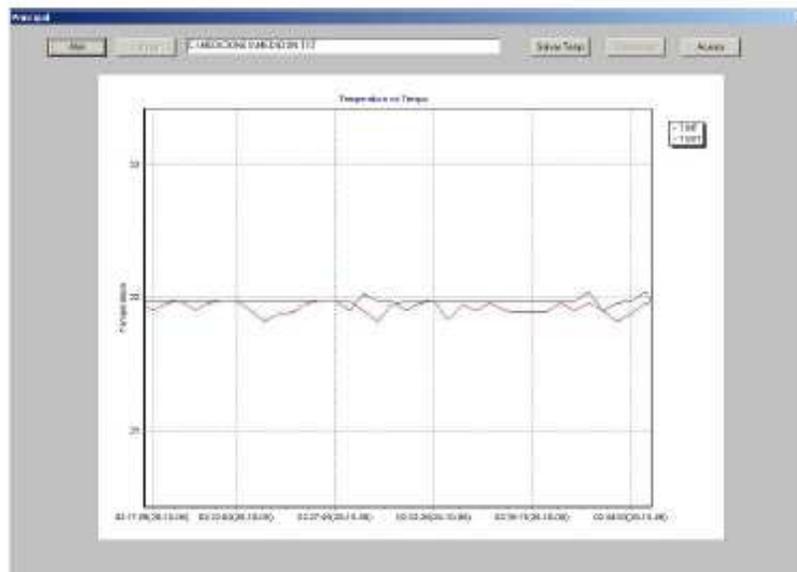


Figura 10 Gráfico a pantalla completa.

Es posible dar zoom al gráfico tanto como se desee, hasta el hecho de poder ver el valor exacto de temperatura o el porcentaje de humedad relativa para un dato de hora y fecha exacto.

Una vez que se desea volver a la pantalla principal, se deberá pulsar nuevamente la leyenda superior.

Para hacer zoom out sobre el gráfico (figura 11) y volver a graficar la tendencia general para todo el rango completo de mediciones, se debe arrastrar el Mouse sobre el gráfico, pero esta vez hacia la izquierda.

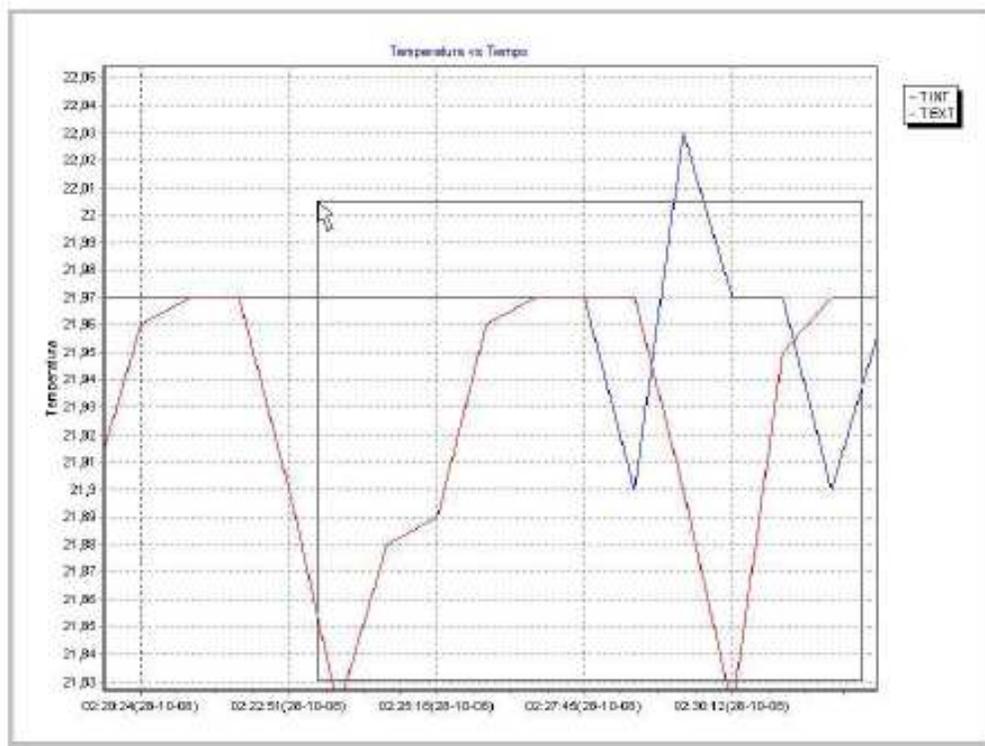


Figura 11 Disminuir la precisión al graficar.

La última acción importante que se puede utilizar (tal como se observa en la figura 12) es, salvar las gráficas. Esto es posible al pulsar los botones para tal efecto. Lo que sucede es que al pulsar el botón Salvar Tem ó Salvar Hum, se

hace una captura del gráfico, y el mismo puede ser pegado en cualquier programa de Windows como mspaint o Word en formato de imagen BMP.

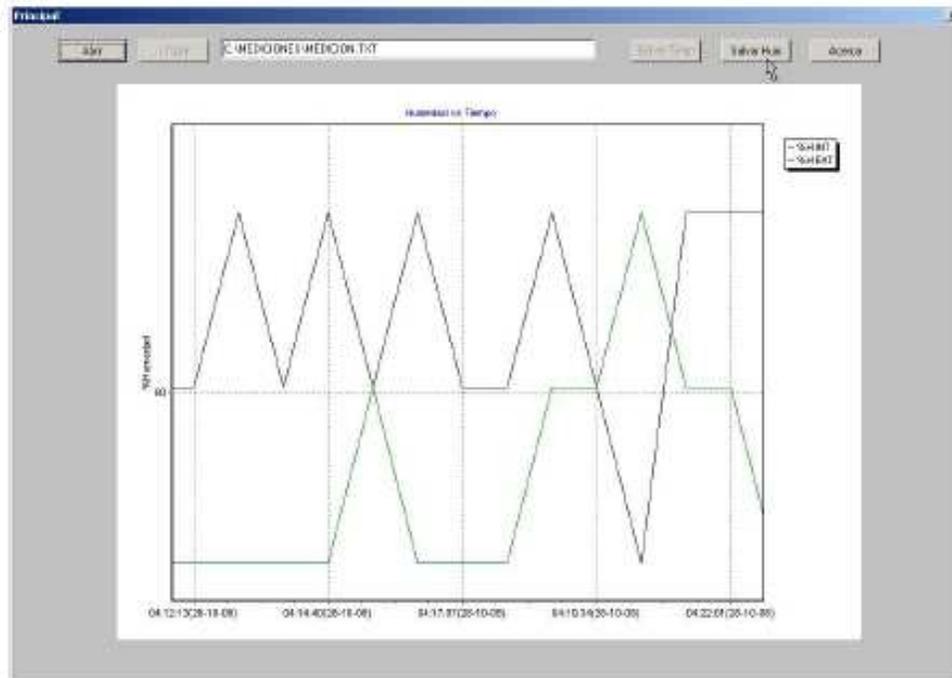


Figura 12 Salvar gráficas.

Se cuenta con la posibilidad de limpiar la pantalla completa, tanto los gráficos como la tabla de datos. Para esto se pulsa el botón Limpiar.

Futuros cambios al funcionamiento o visualización de la interfaz

Para tal efecto se cuenta con la carpeta del programa llamada Secador Solar. Dentro de ella se encuentra tanto la aplicación en su archivo ejecutable (**drive.exe**) implementado en **Borland Delphi 7**, así como las imágenes requeridas dentro de la pantalla principal.

Ahí mismo se cuenta con el archivo **vdrive.pas** donde se encuentra el código fuente de la aplicación. Cualquier cambio futuro deberá realizarse al modificar dicho archivo. Por otro lado se cuenta con el archivo **drive.dpr** que contiene la rutina principal del programa.

Anexo 2^a
Resumen de la ponencia presentada en el XIII Congreso Agropecuario y Forestal 2010
Véase impresión en memoria en el informe escrito

Uso de secadoras solares en pequeña y mediana industria para el secado de madera aserrada de Teca (*Tectona grandis*) especie de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica

Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc²; Ing. Róger Moya Roque, Ph.D³

El valor agregado en productos de madera, utilizando material seco ha sido un factor limitante para los productores nacionales. El productor costarricense no cuenta con la tecnología para secar madera en una forma económica y eficiente y la única técnica que ha utilizado de forma contante, por años, ha sido el secado al aire. El uso de secadoras solares de madera viene a dar esta opción a nuestro productor para que seque la madera de una forma más rápida, obteniendo madera de calidad, aumentando además el valor agregado de la madera.

En este sentido la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica en el Área de Tecnología de Productos Forestales se encuentra ejecutando un proyecto de investigación cuyo objetivo primordial es validar el uso de secadoras solares como tecnología apropiada para el secado de madera aserrada proveniente de plantaciones forestales de rápido crecimiento.

El proyecto de investigación pretende caracterizar el secado de la madera de varias especies, en dos sentidos, por un lado la eficiencia en el secado de la madera utilizando 3 técnicas: secado solar, secado al aire y secado en horno convencional y por otro evaluado la calidad de la madera en función de los diferentes tipos de secado.

Las pruebas de secado fueron ejecutados durante los años 2008 y el 2009 en Cartago, Costa Rica y para ello se contó con cargas equivalentes de madera aserrada de Teca con 2,54 cm de espesor y 7,5 cm de ancho. Tanto para el secado en horno solar, como al aire y en horno convencional, se estableció un diseño experimental con 3 tratamientos que lo constituyen las técnicas de secado dichas y además en cada tratamiento se utilizaron 36 piezas de madera dispuestas aleatoriamente en la pila de madera. En estas piezas de madera se evaluó los diferentes defectos antes y después del secado. El control del contenido de humedad se realizó utilizando muestras testigos.

En este momento se tienen los primeros resultados, específicamente en el secado de madera aserrada de *Tectona grandis*. El secado de esta especie en secador solar de madera se ha comparado con el secado de madera de la misma especie en horno convencional y al aire y además se ha probado las diferencias de secado de la especie a lo largo del año en 3 periodos definidos: estación seca, lluviosa y transición. También ha sido valorada la calidad del secado de la madera en los 6 defectos más comunes: grietas, rajaduras, alabeos, acanaladuras, encorvadura y arqueadura.

Los resultados muestran que el secado en horno solar es una excelente alternativa frente a los secados que utilizan la técnica de secado al aire que es la técnica más utilizada en Costa Rica. El mejor tiempo de secado para la Teca se ha obtenido en la estación seca.

² Profesora e investigadora del Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Escuela de Ingeniería Forestal, Área de Tecnología de Productos Forestales. Teléfono: (506)2550-2142. Fax: (506)2591-3315. E-mail: cysalas@itcr.ac.cr. Cartago, Costa Rica. Apdo 159-7050

³ Profesor catedrático e investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Escuela de Ingeniería Forestal, Área de Tecnología de Productos Forestales. Teléfono: (506)2550-2433. Fax: (506)2591-3315. E-mail: rmoya@itcr.ac.cr. Cartago, Costa Rica. Apdo. 159-7050

La madera inicia verde su secado a un contenido de humedad inicial de 84% y finaliza su secado después de 34 días con un contenido de humedad de 8,6%, mientras que en el secado de madera al aire con un contenido de humedad inicial del 62,7% apenas alcanza un contenido de humedad del 15,7% después de 45 días de secado.

En cuanto a la calidad de la madera se ha observado cambios muy particularmente con el secado en horno convencional, aunque la presencia de los defectos en la madera de verde a seca se mantiene, en algunos tipos de secado la magnitud del defecto se disminuye muy particularmente en los secados al horno solar y al aire, no así en el secado e horno convencional.

En conclusión, se observa que el tiempo de secado tanto al aire como e el horno solar aumentó conforme aumentó la cantidad de lluvias, donde se registra un aumento de la humedad relativa y decrece la temperatura, variando el tiempo de secado de 34 a 50,10 días, en tanto que en el secado al aire los tiempos fueron de 45 días en la estación seca y de 60 días en promedio entre la estación de transición y lluviosa.

En general, en la madera de *T. grandis* se registra un aumento en la cantidad y magnitud de las grietas y las rajaduras en todos los tipos de secado y en todas las épocas del año. La aparición del alabeo luego del secado se presenta en más del 50% de las piezas e incluso hay lotes de madera que se ven afectados hasta en un 92% por este defecto. La encorvadura es un defecto presente casi en la totalidad de la madera aserrada antes y después del secado, varía entre el 94 y el 100%. No obstante, aunque las encorvaduras estén presentes en la condición verde y seca, la magnitud varía. En la condición verde se observa que los valores promedio varían entre 10 mm y 15,5 mm, mientras que en la madera secada estas magnitudes se reducen ligeramente, entre 8 mm y los 11 mm. La arqueadura es otro defecto de alta incidencia no solo en la madera verde, si no que también en la madera seca. Se presenta entre 83% y el 100% de las piezas de madera. La aparición del colapso después del secado no es un defecto común es esta especie, luego del secado solo apareció en un 5,56 % de las piezas y muy particularmente en el secado en horno convencional de la estación de transición.

El secado de la madera utilizando el horno solar mejora sustancialmente no solo el tiempo de secado de la madera con respecto a la técnica de secado al aire sino que resulta en madera menos defectuosa en cuanto a la magnitud de los daños que la madera seca en horno convencional.

Secadoras solares de madera aserrada

Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc.¹⁰

El valor agregado en productos de madera, utilizando material seco, es un factor limitante para la mayoría de los productores forestales nacionales, quienes no cuentan con tecnología para secar madera en forma económica y eficiente.

Por años, la única técnica utilizada, ha sido el secado al aire. Algunos pocos secan en hornos convencionales; sin embargo, este método de secado se caracteriza por un costo elevado que de momento la mayoría de los productores prefieren evitar. El uso de secadoras solares de madera viene a dar esta opción al productor, al permitirle secar la madera de forma más rápida, obtener un producto de calidad y aumentar su valor agregado.

El secador solar de madera es una cámara que tiene la capacidad de almacenar el calor generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura, ese calor se almacena para ser utilizado en el proceso de secado de la madera. El uso de esta tecnología es de bajo costo y muy accesible a los pequeños y medianos productores. El consumo de energía eléctrica es bajísimo y el mantenimiento de la infraestructura es básico y sencillo. Lo mejor de esta tecnología es que armoniza con el ambiente, pues no es contaminante.

Un secador solar de madera es útil y eficiente si se construye adecuadamente. Es decir, lo relevante de un horno de estos es que la energía que calienta el sistema, que es el sol, debe permanecer atrapada en la cámara de secado la mayor cantidad de tiempo posible, de manera que el aislamiento térmico debe ser muy bueno.

Componentes de la secadora solar

El **cimiento** da soporte estructural a la cámara y aísla la humedad y temperatura a través del suelo.

Las **paredes y puertas** deben asegurar que la temperatura interna se mantenga lo más



posible dentro de la cámara y que la humedad externa no ingrese a la misma. Se pueden utilizar materiales aislantes como lana de fibra de vidrio o el estereofón.

Ventanillas o ventilas que sirven de intercambio de aire interno con externo, cuando la humedad relativa interna de la cámara sea muy alta.

El **techo** de un secador debe garantizar el ingreso de los rayos solares. Se recomienda

para la construcción del techo vidrio de 3 mm y construirse con la inclinación adecuada a la latitud.

El **colector solar** es una estructura de hierro capaz de almacenar el calor que se genera por la incidencia de los rayos solares sobre él.

Circulación del aire dentro de la cámara y entre la pila de madera, se requiere la instalación de abanicos. La cantidad y capacidad de los abanicos depende del tamaño de la cámara.

El **baffle** o lona es una estructura ubicado entre el colector y la pila de madera y tiene la función de evitar la incidencia directa de la corriente de aire sobre la madera.

La Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica construyó un modelo de secadora solar. Parte de los resultados obtenidos en estas pruebas de secado se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1

Tiempos de secado por especie según tipo de secado durante las estaciones seca y lluviosa en Cartago, Costa Rica.

Especie	Tipo de secado	Estación	CH i (%)	Tiempo de secado en días	CH f (%)
Teca	Solar	Seca	84	31	12
Teca	Aire	Seca	63	45	16
Teca	Solar	Lluviosa	76	36	12
Teca	Aire	Lluviosa	78	59	19
Melina	Solar	Seca	154	49	12
Melina	Aire	Seca	111	57	26
Melina	Solar	Lluviosa	165	83	16
Melina	Aire	Lluviosa	141	83	40

Ventajas de construir secadoras solares

- Los materiales que se requieren son comunes y están disponibles en el mercado nacional.
- Son sencillas en cuanto a diseño y operan con mucha facilidad.
- Los costos de construcción son bajos y la inversión podría recuperarse en 18 meses.

- Se logra llevar la madera a contenidos de humedad de 12%, que son adecuados para trabajar productos acabados como en la industria del mueble, puertas y otros.

- Aunque los costos de operar un secador solar son más altos que el secado al aire, son un 85% más bajo que secar madera en hornos convencionales.

¹⁰ Escuela de Ingeniería Forestal ITCR, correo: cysalas@itcr.ac.cr

Anexo 2c

Publicación para Investiga TEC

Secadoras Solares de madera aserrada

Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc
Profesora e investigadora
Centro de Investigación en Integración Bosque Industria
Escuela de Ingeniería Forestal
Instituto Tecnológico de Costa Rica
cysalas@itcr.ac.cr

El valor agregado en productos de madera, utilizando material seco, es un factor limitante para la mayoría de los productores forestales nacionales, quienes no cuentan con la tecnología para secar madera en forma económica y eficiente.

Por años, la única técnica utilizada ha sido el secado de madera al aire de la madera aserrada. Algunos pocos productores secan en hornos convencionales; sin embargo, este método de secado se caracteriza por un costo elevado que de momento los productores prefieren evitar. El uso de secadoras solares de madera aserrada viene a dar esta opción al productor, al permitirle secar la madera de forma más rápida que el secado al aire y con ello obtener un producto de calidad con un valor agregado mayor.

El secador solar de madera es una cámara que tiene la capacidad de almacenar el calor generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura, ese calor se almacena para ser utilizado en el proceso de secado de la madera. El uso de esta tecnología es de bajo costo y muy accesible a los pequeños y medianos productores. El consumo de energía eléctrica es bajísimo y el mantenimiento de la infraestructura es básico y sencillo. Lo mejor de esta tecnología es que armoniza con el ambiente, y aprovecha una energía altamente abundante en el trópico, además que la energía no es contaminante.

Un secador solar de madera aserrada será útil y eficiente si se construye adecuadamente. Lo relevante de un horno solar es que la energía que calienta el sistema, proviene del sol, esa energía se atrapa en forma de calor y debe permanecer atrapada en la cámara de secado la mayor cantidad de tiempo posible, de manera que el aislamiento térmico de la cámara debe ser muy bueno.

Componente de la secadora solar

El **cimiento** da soporte estructural a la cámara y aísla la humedad y temperatura a través del suelo.

Las **paredes y puertas** deben asegurar que la temperatura interna se mantenga por el mayor tiempo posible, dentro de la cámara y que la humedad externa no ingrese a la misma. Se pueden utilizar materiales aislantes como la lana de fibra de vidrio o el estereofón.

Ventanillas o ventilas que sirven de intercambio de aire interno con externo, esto para cuando la humedad relativa dentro de la cámara es muy alta.

El techo de un secador solar debe garantizar el ingreso de los rayos solares, pero debe evitar su salida, se recomienda para ello utilizar en la construcción vidrio de 3 mm y construir el mismo con la inclinación adecuada según la latitud donde se construya la cámara de secado. Para Costa Rica el techo deberá tener una inclinación aproximada a los 10% en la dirección Norte-Sur, con el fin de que los rayos solares incidan perpendicularmente al colector durante todo el año.

El colector solar de temperatura es una estructura de hierro capaz de almacenar el calor que se genera por la incidencia de los rayos solares sobre él, debe tener el calibre adecuado para que el almacenamiento sea eficiente y siempre se coloca debajo del techo.

Para la circulación del aire dentro de la cámara y entre la pila de madera, se requiere la instalación de

abanicos. La cantidad y capacidad de los abanicos depende del tamaño de la cámara.

El baffle o lona es una estructura ubicado entre el colector y la pila de madera y tiene la función de evitar la incidencia directa de la corriente de aire sobre la madera.

El proyecto

La Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica construyó un modelo de secadora solar. Posteriormente con el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC, y el apoyo material de empresas como Hacienda Junquillal y Maderas Cartago quienes facilitaron cargas de madera aserrada, se realizó una validación del funcionamiento de la secadora de madera, bajo condiciones ambientales de Cartago y en condiciones reales de trabajo de un secador. La investigación que se prolongó por 24 meses fue liderada por la Escuela de Ingeniería Forestal pero incluyó la participación de dos escuelas más que participaron dentro del proyecto durante los primeros 12 meses del proyecto.

El proyecto consistió en realizar simultáneamente pruebas de secado de madera de *Tectona grandis* y de *Gmelina arborea*, ambas especies de 2,54 cm de espesor, en el secador solar y al aire. Estas pruebas se realizaron en la época seca, en la época lluviosa y en una estación que se denominó intermedia. Las pruebas se realizaron con el objetivo de determinar los tiempos de secado de la madera bajo estas dos condiciones y de paso con las primeras pruebas se valoró la eficiencia para atrapar calor el calor en esta secadora..

Parte de los resultados obtenidos en estas pruebas de secado se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tiempos de secado de madera aserrada, por especie y según tipo de secado durante las estaciones seca y lluviosa en Cartago, Costa Rica

Especie	Tipo de secado	Estación	CHi (%)	Tiempo de secado en días	CHf (%)
Teca	Solar	Seca	84	31	12
Teca	Aire	Seca	63	45	16
Teca	Solar	Lluviosa	76	36	12
Teca	Aire	Lluviosa	78	59	19
Melina	Solar	Seca	154	49	12
Melina	Aire	Seca	111	57	26
Melina	Solar	Lluviosa	165	83	16
Melina	Aire	Lluviosa	141	83	40

*Contenido de humedad en equilibrio para Cartago 16%.

Adicionalmente al secado de madera el proyecto contempló la elaboración de un prototipo electrónico que registre la humedad interna y externa de la cámara, así como la temperatura, de esta forma el sistema electrónico permite bajo ciertas condiciones ambientales internas y externas que se abran o cierren de forma automática las ventilas de intercambio de aire con el ambiente con miras a reducir la humedad relativa en la cámara. Este prototipo fue desarrollado con la participación de la Escuela de Ingeniería en Electrónica.

Por su parte, con la participación de la Escuela de Electromecánica se revisó la cámara de secado y se probó experimentalmente la circulación del aire y la eficiencia para atrapar temperatura. En esta parte del desarrollo del proyecto se ensayó la utilización de sustancias para disminuir la humedad relativa interna utilizando diferentes sustancias desecantes, además se ensayó si los cambios de color externos repercutían en la temperatura atrapada. Los resultados de esta etapa demostraron que las especificaciones de los abanicos utilizados y su posición dentro de la cámara aseguran el flujo de aire adecuado para el secado de madera, además se logró demostrar que la adición de sustancias desecantes y el cambio de color no producen aumentos

estadísticamente significativos en la temperatura de la cámara.

¿Que más se ha logrado?

Adicionalmente a los resultados de tipo técnico que este proyecto ha obtenido es importante resaltar la atracción que ha surgido en los productores pequeños sobre el uso de este tipo de secadoras de madera. La Ciudad de los Niños ya construyó un modelo de secadora de madera similar al nuestro, esa secadora fue construida dentro de un proyecto productivo en donde también la Escuela de Ingeniería Forestal estaba encargada de la parte de manejo e industrialización del módulo forestal de esta finca. Se ha difundido resultados de este proyecto en el XIII Congreso agronómico y forestal y se difundió gran cantidad de información en diferentes eventos como la exporegional de Golfito, y algunas ferias vocacionales realizadas en la zona de los Santos y en Puerto Jiménez de Golfito.

¿Qué sigue?

Aunque el proyecto de investigación en su fase activa concluyó el pasado 31 de diciembre, 2010; aún la secadora solar se mantiene en funcionamiento constante, se ha utilizado en secado de aserrín y secado de corona de piña para otros proyectos de investigación de Escuela de Ingeniería Forestal. Se han realizado pruebas de secado de plásticos para un proyecto de reciclaje y además está el interés de poner a funcionar un secador similar a este para el secado de raíz de *Quassia amara* en el Atlántico.

Ventajas de construir secadoras solares

- Los materiales que se requiere son comunes y están disponibles en nuestro mercado nacional.
- Las secadoras solares son sencillas en cuanto a diseño y operan con mucha facilidad.
- Los costos de construcción no son altos y la inversión podría recuperarse en menos de dos años.
- Se logra llevar la madera a contenidos de humedad de 10 % y 12%, que son contenidos adecuados para trabajar productos acabados como en la industria del mueble, puertas y entre otros.
- Aunque los costos de operar un secador solar son más altos que el secado al aire, son un 85% más bajo que secar madera en hornos convencionales.

Participantes:

Escuela de Ingeniería Forestal

Ing. Cynthia Salas Garita, M.Sc. Coordinadora del proyecto

Ing. Róger Moya Roque, Ph.D.

Escuela de Ingeniería en Electrónica

Ing. Arys Carrsquilla Batista, M.Sc.

Escuela de Electromecánica

Ing. Ignacio del Valle Granados, M.Sc.

Anexo 2d

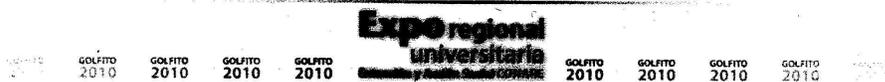


Foto 1. Stand de Exposición del Proyecto



Foto 2. Asistentes a charla sobre proyecto

Anexo 2e
Certificado de Participación en Expo regional Golfito 2010



CERTIFICACIÓN

Por este medio se hace constar que **Cynthia Salas Garita**, profesora e investigadora de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, participó en la V Expo Regional Universitaria CONARE 2010, como expositora del proyecto **Secadoras solares para madera aserrada en pequeña y mediana industria**.

La V Expo Regional Universitaria se efectuó durante los días 09 y 10 de abril de 2010 en el Parque de Golfito.



Dr. Dagoberto Arias Aguilar
Vicerrector
Vicerrectoría de Investigación y Extensión



Licda. Mariela Hernández Ramírez
Comisión Organizadora
V Expo Regional Universitaria, CONARE

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA





CONARE
Extensión y Acción Social

CONSEJO NACIONAL DE RECTORES
Comisión de Vicerrectores de Extensión y Acción Social
Sub-Comisión Expo Regional Universitaria

Otorga el presente

Certificado de reconocimiento por la presentación del proyecto:

**SECADORAS SOLARES PARA MADERA ASERRADA
EN PEQUEÑA Y MEDIANA INDUSTRIA**

en el marco de la

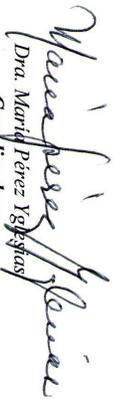
V EXPOREGIONAL GOLFITO 2010

realizada los días 9 y 10 de abril de 2010

Dado en Golfito, a los diez días del mes de abril de 2010.


Licda. Alejandra Guerra Chaves
Coordinadora
Sub Comisión Expo-Regional Universitaria




Dra. María Pérez Iglesias
Coordinadora
Comisión de Vicerrectores