

DISPONIBILIDAD TÉRMICA SOLAR Y SU APLICACIÓN EN EL SECADO DE GRANOS

RESUMEN

El presente trabajo, con base en la disponibilidad térmica solar que se tiene en la superficie terrestre nacional analiza las posibilidades que ésta brinda para su aplicación en los procesos agroindustriales. Se analiza el proceso de secado en dos productos importantes para el país: café y arroz. Por último, se analizan diferentes tipos de secadores presentando la aplicación de modelos teóricos y su análisis termodinámico, para evaluar cual es el de mejores perspectivas.

PALABRAS CLAVES: Disponibilidad térmica solar, Proceso de secado.

ABSTRACT

The present work based on the thermal solar availability that it has in the national terrestrial surface analyses the possibilities that offer for their application in the agro-industrial processes. The drying process of two important products for the country is analysed: coffee and rice. Finally, different types of dryers are analysed presenting the application of theoretical models and its thermodynamic analysis, in order to evaluate which is the one of better perspective.

KEYWORDS: *Thermal solar availability, drying process.*

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la energía que el sol proporciona se convierte en calor al llegar a la superficie terrestre y debido a ello se facilita su empleo en ciertos campos específicos. A pesar de las posibilidades que brinda esta forma de energía, en lo que tiene que ver con su aprovechamiento, a nivel nacional no está lo suficientemente utilizada, y los estudios, por lo menos en cuanto al sector agrícola se refieren, no están desarrollados o no han sido difundidos suficientemente.

Revisando los subprocesos realizados a granos y cereales una vez termina la cosecha, el secado del mismo resulta ser atractivo dada la exigencia de energía que se involucra en el mismo y es en este proceso en donde se podría aprovechar el recurso energético solar, ya que los granos húmedos constituyen un medio ideal para el desarrollo de microorganismos, insectos y ácaros, además de permitir muy posiblemente la germinación del mismo.

El análisis de secado de granos requiere conocer no solo de principios de psicrometría y transferencia de calor si no del estudio de otras ramas de la física como la higriscopía, que permite predecir cuales serán los cambios de humedad dentro del producto con base a las condiciones del aire de secado.

La literatura muestra que las ecuaciones que predicen la evolución de un proceso de secado de grano requieren del conocimiento de la cantidad de energía que involucra la eliminación de un cierto volumen de agua contenida en el producto. Tal cantidad de energía se puede predecir hoy en día gracias al estudio de las propiedades térmicas de

ALVARO HERNÁN

RESTREPO VICTORIA

Profesor Auxiliar, M.Sc., I.M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
arestrep@utp.edu.co

JUAN CARLOS BURBANO

JARAMILLO

Profesor asistente, M.Sc., I.M.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
jurbano@utp.edu.co

los granos. Una de ellas es la entalpía o calor latente de vaporización, la cual es una propiedad que permite establecer la cantidad de calor necesario para evaporar una determinada cantidad de agua contenida en el producto. De ella depende mucho el tiempo esperado de secado y la energía total consumida durante el proceso; por ello su determinación es necesaria.

Con base en todo lo anterior, el trabajo describe algunos de los conceptos más importantes relacionados con el tema, identifica los procesos agrícolas de mayor impacto a nivel nacional donde se utiliza el calor, analiza el proceso de secado, hace un análisis comparativo de los secadores y presenta la aplicación de modelos teóricos y su análisis termodinámico, por último se analizan las curvas de eficiencia y se generan las conclusiones.

2. DISPONIBILIDAD TÉRMICA SOLAR

Para obtener la disponibilidad térmica es necesario cuantificar la cantidad de radiación que está llegando a un determinado sitio. En este caso es posible obtener el dato a partir de las curvas de radiación solar. Aunque algunas veces esta información no está disponible para la fecha y el lugar requerido, es posible calcularla recurriendo a sus métodos de cálculo. Para ello son de vital importancia el índice de transparencia atmosférica y el número de horas de mayor disponibilidad de sol, datos que para el presente estudio fueron suministrados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

Por otro lado, ya que es más práctico trabajar con valores promedio mensuales, para aminorar un poco la influencia de los factores atmosféricos aleatorios, se trabajará con valores promedio de radiación global. En la tabla 1 se

presentan tales valores, para los meses de Enero, Febrero y Agosto.

Mes	Día	H_h (MJ/m ²)	H_0 (MJ/m ²)
Enero	19	11,302	17,124
	20	12,010	19,370
Febrero	1	13,768	23,335
	26	14,149	23,789
Agosto	7	19,176	27,330
	15	20,375	28,601

Tabla 1. Datos meteorológicos para algunos días del año tomados de las gráficas de radiación global extraterrestre (latitud norte $\approx 4^\circ$).

Donde:

H_h , es la radiación global o hemisférica promedio diaria, siendo la suma de la radiación directa y la radiación difusa. H_0 es el valor de la radiación total incidente fuera de la atmósfera, medida sobre un plano perpendicular a la dirección de la radiación e integrada para un intervalo de tiempo comprendido entre la salida y puesta del sol.

Tal como se puede ver en la tabla 1, el mes de agosto presenta valores altos de radiación dada la baja atenuación atmosférica que normalmente se da en esta época del año para la latitud en mención.

3. IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS AGROINDUSTRIALES

Dada la variedad de productos agrícolas que pueden ser potencialmente empleados, se analizaran solo aquellos considerados de mayor impacto o diversificación a nivel nacional. Con base a información obtenida de la secretaría de agricultura del Tolima, se pudo establecer que dos de los productos agrícolas más importantes son el café y el arroz y adicional a ello a través de CORPOICA se encontró que dos de los procesos que utilizan el calor para procesar alimentos son la deshidratación de pulpa de fruta y el secado de granos.

Teniendo en cuenta que el secado de granos es una alternativa viable, donde se elimina agua del producto mediante el empleo de aire atmosférico a bajas temperaturas (65 °C para el caso de arveja verde, y 50 °C en el caso de arroz y café) y de menor costo, ya que permite el empleo de materiales de fácil consecución incluso en una finca, se decidió estudiar que tan viable resulta la implementación de la energía solar para su procesamiento.

En general el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de un cierto material. En el secado, el agua casi siempre se elimina en una mezcla de aire - vapor de agua. Los métodos de eliminación de humedad, varían desde medios mecánicos, utilizando prensas, máquinas centrífugas, hasta el secado por medios térmicos con aire caliente por tiro natural o forzado.

4. EVOLUCIÓN DEL AIRE DURANTE UN PROCESO DE SECADO.

4.1 Humedad de Equilibrio de una Sustancia x_e

La humedad de equilibrio se define como el contenido de humedad de un material higroscópico, después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa durante un lapso de tiempo prolongado. Se puede decir además, que en el equilibrio higroscópico, la presión de vapor de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor de agua del aire ambiente.

4.2 Humedad libre de una sustancia (X)

El contenido de humedad libre es la cantidad de agua evaporable de un producto bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura, por lo tanto:

$$X = x_i - x_e \quad (1)$$

Donde

X = Humedad libre del producto (kg H₂O/kg_{ss})

x_i = Humedad inicial del producto (kg H₂O/kg_{ss})

x_e = Humedad de equilibrio del producto (kg H₂O/kg_{ss})

En el caso de los productos alimenticios existen ecuaciones que permiten predecir el contenido de humedad de equilibrio de los productos biológicos en función de las condiciones del medio ambiente, y se denominan Isotermas de Sorción.

Para arroz se encontró, según el modelo de Chung-Pfost [12] lo siguiente:

$$x_e = 0.29394 - 0.046015 \cdot \left[\ln \left[\ln \left| \frac{1}{\phi} \right| \cdot (T + 35.703) \right] \right] \quad (2)$$

Donde la humedad relativa ϕ se expresa en decimal, la temperatura T en °C.

En el caso de café no se encontraron los parámetros para estas ecuaciones, pero el Centro de Investigaciones del Café Cenicafé [11], ha estudiado este fenómeno y presenta el siguiente modelo:

$$x_e = \left[61.03085\phi - 108.37\phi^2 + 74.46\phi^3 \right] \cdot e^{\left[-0.03705\phi + 0.0701\phi^2 - 0.03518\phi^3 \right] \cdot T} \quad (3)$$

Donde igualmente x_e es la humedad del grano en kg H₂O/kg_{eps} (kilogramos de agua por kilogramos de café pergamino seco), ϕ es la humedad relativa en decimal, y T la Temperatura en °C.

5. CURVAS DE SECADO

Este tipo de curvas sirven para determinar el tiempo requerido para que un determinado producto sufra un descenso esperado en su contenido de humedad, y así mismo poder establecer el gasto energético durante el lapso de tiempo transcurrido.

Estas curvas se obtienen experimentalmente y presentan un comportamiento especial a medida que avanza el proceso como se puede observar en la figura 1.

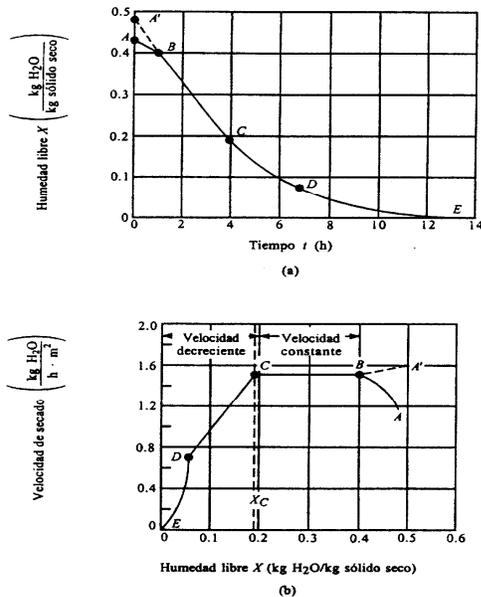


Figura 1. Curva típica de secado para condiciones de secado constante: (a) Humedad libre en función del tiempo. (b) curva de la velocidad de secado en función del contenido de humedad libre. [4]

La figura 1(a) es la que se obtiene vía experimental, y la figura 1(b) se obtiene de la primera, mediante la determinación puntual de las pendientes de esa gráfica para cada valor de humedad.

Estas curvas varían en función del tipo de producto, velocidad, temperatura y humedad relativa del aire, dirección del flujo, y espesor de la capa de granos. Algunas veces no se poseen datos experimentales del proceso, y por ello se hace necesario recurrir a modelos teóricos de predicción del secado.

5.1 Secado durante el período de velocidad constante.

Se caracteriza porque la superficie del sólido está al principio muy mojada y sobre ella existe una película de agua continua, por lo que la velocidad de evaporación es igual a la de una superficie líquida pura. En la figura 1(b) línea B-C, se puede observar el período de secado a velocidad constante.

5.2 Secado durante el período de velocidad decreciente.

El punto C de la figura 1(b) corresponde al contenido crítico de humedad libre χ_c . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua; La superficie ya no esta totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir hasta que la misma queda seca en su totalidad en el punto D de la figura 1(b).

6. CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN DE GRANOS Y SU DETERMINACIÓN

La entalpía o calor de vaporización se define como la energía necesaria para que una unidad de masa de una sustancia pase del estado líquido al gaseoso. Si se trata de productos biológicos, tales como los granos, se define como la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en el producto.

6.1 Calor de vaporización para Arroz

En el caso del arroz, la entalpía o calor de vaporización, conforme a la definición anterior, se obtiene mediante siguiente ecuación [13], para T en °C y χ_e .

$$h_s = (2501.5 - 2.373T) \cdot (1 + 4.35 e^{-28.25\chi_e}) \quad (4)$$

6.2 Calor de vaporización para el Café

Para el caso del café se han encontrado valores experimentales que se presentan en la tabla 2. Hay que anotar que los valores teóricos se obtienen siguiendo la ecuación propuesta por [13]:

$$h_s = (2501.5 - 2.373T) \cdot (1 + 4.7053 e^{-28.24\chi_e}) \quad (5)$$

Contenido humedad (bs)	Calor latente de vaporización kJ/ kg		
	10 °C	30°C	55°C
(%)			
10	5202.6	5104.1	4978.3
20	4912.8	4819.8	4701.0
30	4450.3	4366.0	4258.4
40	3883.8	3810.3	3716.4
50	2911.9	2856.7	2786.3
Agua Libre	2477.7	2430.5	2370.7

Tabla 2. Valores experimentales de calor latente de vaporización para café

7. ENERGÍA TÉRMICA SOLAR Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SECADORES

Para el caso del secado de granos, el producto puede tratarse mediante captación solar directa e indirecta. En esta última, los dos elementos están separados y el aire es calentado en el colector y la radiación no incidirá sobre el producto colocado en la cámara de secado. Este tipo de secador es esencialmente convectivo y aquí el sol,

captado a través de un banco de colectores, actúa como fuente energética. En el secado directo, los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

Ya que el análisis está restringido para una producción a baja escala (se considera producción a baja escala a cantidades no superiores a 227 kg [12]), se escogieron dos tecnologías de secadores adecuados a esta necesidad teniendo en cuenta el costo de los materiales involucrados. Estas se describen a continuación.

7.1 Secador solar parabólico

El secador solar con cubierta parabólica es una máquina con estructura en la misma forma, que facilita el secado de café pergamino. El sistema básico empleado por este secador es de tipo invernadero, donde como su nombre lo indica, aprovecha este fenómeno para producir una concentración de calor debido al principio físico que involucra. Un secador de este tipo se puede observar en la figura 2.



Figura 2. Secador solar con cubierta de plástico (agrolen).

7.2 Secador Solar Indirecto por Convección Forzada

Aquí el movimiento de aire se realiza por convección forzada, debido a que el tamaño del área de colección no permite convección natural. El secador es de tipo indirecto, usando una cámara de secado separada, sin acceso para la radiación, lo cual resulta beneficioso en el caso de productos cuya calidad se ve perjudicada por la acción de la radiación, como en el caso del arroz. La figura 3 muestra un secador de este tipo.

ESQUEMA:

- 1. Colector
- 2. Ventilador
- 3. Túnel de Secado
- 4. Radiación Solar
- 5. Circulación de Aire

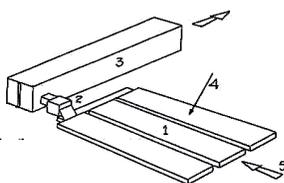


Figura 3. Secador solar indirecto por circulación forzada.

El aire ambiente pasa por los colectores calentándose, cruza el ventilador que lo impulsa y entra al túnel de secado, donde encuentra el producto a deshidratar.

8. APLICACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS Y ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA SECADO

8.1 Análisis para café mediante secador solar parabólico tipo invernadero.

A partir de los tiempos de secado presentados por las curvas de la figura 4, es posible deducir el incremento de calor adicional que el secador parabólico tipo invernadero, proporciona al café con respecto al calor generado por un medio convencional como es el secado al aire libre.

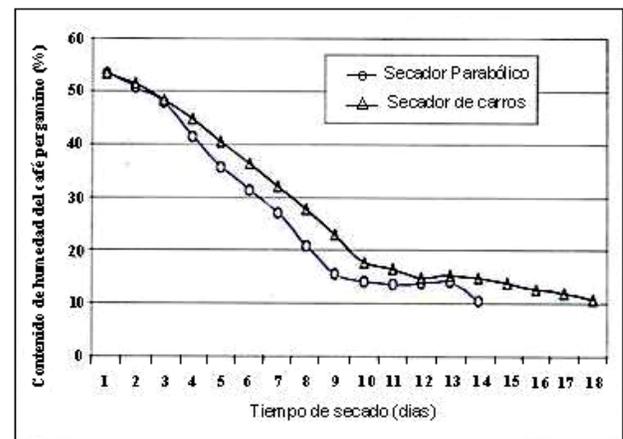


Figura 4. Comparación del secado de capas de café dispuestas en los carros convencionales y en el secador solar con cubierta parabólica. [12]

Al analizar los tiempos de secado de la figura 4 se obtiene:

$$\frac{Q_{as1}}{Q_{as2}} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{18 \text{ dias}}{14 \text{ dias}} = 1.286$$

Donde:

Q_{as1} : Calor absorbido por el producto al aire libre.

Q_{as2} : Calor absorbido por el secador tipo invernadero.

Lo que significa, que el incremento de calor producido por el efecto invernadero corresponde 28.6%.

Luego aplicando los datos promedio mensuales para un mes donde la disponibilidad solar es mayor (mes de agosto, acorde con tabla 1) se tiene:

$$H_h = 0.6173 \times 28.6 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia} = 17.56 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

Donde el factor 0.6173 corresponde al índice de transparencia atmosférica para el mes de agosto según históricos.

Al aplicar las condiciones atmosféricas promedio para el mes citado, de acuerdo con la información del IDEAM se obtienen los siguientes resultados:

El tiempo de secado al aire libre está dado por [12]:

$$\Delta t_2 = \frac{m_f}{R_{c2} \times A} = \frac{0.852 m_s}{2.71 \times 20} = 3.57 \text{ dias}$$

Donde:

0.852 corresponde a la cantidad de agua equivalente a 1 kg de café pergamino seco [12].

R_{c2}: Esta cantidad es función de la entalpía de vaporización calculada a partir de las ecuaciones 4 y 5 e indica la velocidad de secado para producto al granel.

A: Área de interés en el proceso de secado en m².

m_s: Corresponde a una carga de 227 kg de café pergamino.

Al reemplazar los datos correspondientes para el caso del secador parabólico este valor es de:

$$\Delta t_1 = \frac{193.4 \text{ kgH}_2\text{O}}{3.486 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \times 20 \text{ m}^2} = 2.75 \text{ dias}$$

Los tiempos encontrados tanto para secado al aire libre como para el secador parabólico no corresponden con los mostrados en la figura 4, dado que para el análisis teórico realizado aquí, la cantidad de café pergamino correspondió a una carga de 227 kg.

Para este tipo de secado la eficiencia térmica es equivalente a la absorptividad global del producto, por tanto se tiene que para secado al aire libre η₁ = 58.32 % y para secador parabólico tipo invernadero η₂ = 75%. [12]

La energía requerida para secar 227 kg_{cps} con un número de horas de brillo solar, calculado de la ecuación de Angstrom [9], igual a 6.55 horas y utilizando el secador parabólico tipo invernadero es:

$$E_{os1} = \frac{H_h \cdot A \cdot \Delta t_1}{N_h} = 147.45 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} (0.762 \text{ MJ} / \text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{hr})$$

Igualmente para el segundo caso se tiene (secado al aire libre), que la energía total consumida es:

$$E_{os2} = \frac{H_h \cdot A \cdot \Delta t_2}{N_h} = 191.417 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} (0.989 \text{ MJ} / \text{kgH}_2\text{O} \cdot \text{hr})$$

Donde H_h es la radiación promedio mensual y N_h el número de horas de brillo solar. Para un total de 6.55 horas de brillo solar se tiene entonces que E_{os1} es 965.79 MJ/kg_{H2O} y E_{os2} es 1253.78 MJ/kg_{H2O}

8.2 Análisis para café mediante secador solar indirecto por convección forzada.

Ya que para este tipo de secador no existen curvas de secado se emplearon los modelos de predicción, las isotermas de sorción y la ecuación de calor de vaporización obteniendo lo siguiente:

$$\Delta t = \frac{m_f}{m_f / t} = \frac{0.852 \cdot m_s}{m_f / t} = \frac{0.852 \times 227 \text{ Kg}_{cps}}{208 \text{ KgH}_2\text{O} / \text{dia}} = 0.93 \text{ dias} (7.44 \text{ h})$$

Y la energía total consumida por el secador será:

$$E_{os} = Q_d \cdot \Delta t = 310.17 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} (1.60 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{hr})$$

Y la eficiencia del proceso del secado para un mes como agosto alcanza el 29% tal como se muestra en la figura 5

8.3 Análisis para arroz mediante secador solar indirecto de convección forzada.

Siguiendo la metodología expuesta anteriormente para el caso del café, se obtienen los siguientes datos para el caso del secado de arroz:

- t_{is} = 11.87 h
- η = 11.2%
- E_{is} = 3960 MJ (14MJ/kg_{H2O})

9. CURVAS DE EFICIENCIA

A continuación se presentan las curvas que fueron proyectadas de acuerdo al análisis termodinámico de secado de los modelos teóricos empleados.

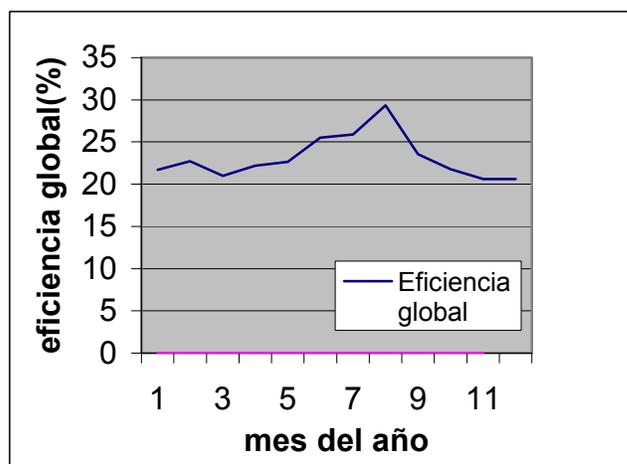


Figura 5. Eficiencia global vs época del año para secado de café mediante secador solar de convección forzada

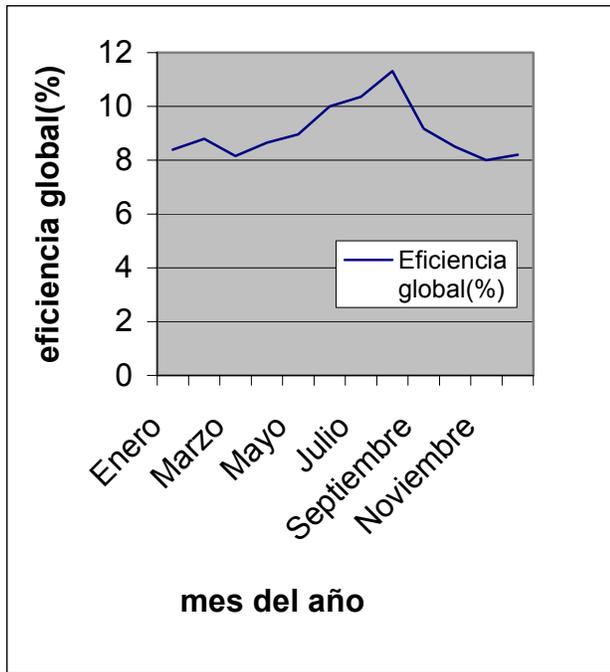


Figura 6. Eficiencia global vs época del año para secado de arroz mediante secador solar de convección forzada

10. CONCLUSIONES

Se pudo concluir que uno de los procesos más importantes del sector agrícola donde se podía emplear la energía solar era el secado de granos, debido a su alta diversificación en todo el país, y a la necesidad de disminuir su humedad con el fin de poder almacenarlos de manera segura.

De acuerdo con los datos de brillo solar y temperatura proporcionados por el IDEAM para el desarrollo de este trabajo, se pudo establecer que el mes más seco, y por lo tanto el de mayor disponibilidad de la fuente solar era el mes de agosto.

Se determinó que las mejores alternativas de captación de energía solar fototérmica, debido a sus bajos costos de instalación y casi nulo mantenimiento eran los secadores tipo invernadero con cubierta de plástico térmico.

Se encontró que el secador parabólico tipo invernadero diseñado por CENICAFE presenta un factor de concentración de calor de hasta un 28,6% adicional con respecto al secado al aire libre, lo que muestra la conveniencia de este tipo de secador.

Al evaluar la eficiencia global se encontró que el secador que mejor aprovechaba la energía disponible es el secador solar parabólico tipo invernadero. Esto no solo debido al factor de concentración de calor que se genera en su interior, si no además por que el producto recibe directamente la energía disponible del sol sin tener que pasar por un paso adicional para su transformación, como es el caso del secador solar de convección solar.

Se concluyó finalmente, que aunque el secador solar indirecto no es tan eficiente como el secador solar parabólico, sus características especiales si permiten secar otros tipos de granos que como el arroz, no pueden recibir la radiación directa.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CASTILLO N, Alvaro. Manual práctico para manejo de granos. Bogotá: Ediagro, 1990.115p.
- [2] CORVALAN, R et al. Ingeniería del secado solar. Subprograma VI: Nuevas fuentes y conservación de la energía. CYTED-D. 1992.
- [3] DESRASIER W, Norman. Conservación de alimentos. 2ª ed. México: Compañía editorial continental, 1984.
- [4] GEANKOPLIS J, Christie. Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Compañía editorial continental. 1984.
- [5] HANS, Rau. Energía solar aplicaciones prácticas. México: Ed Marcumbo. 1984
- [6] HOLMAN P, J. Transferencia de calor . México: Grafo editores S. A. 1993.
- [7] KNEVIE, Fiedrich. Técnica de procesos en las industrias químicas y derivados. El secado. En: Enciclopedia de la tecnología química. Munich: Urma S. A. Ediciones. 1982. v. 1.
- [8] MANRIQUE A, José. Energía solar y aplicaciones fototérmicas. México: Ed Harla. 1984.
- [9] OROZCO H, Carlos Alberto. Elementos de Energía Solar. U.T.P. Abril 1996.
- [10] ROA M, Gonzalo et al. Beneficio ecológico del café. Chinchina: CENICAFE. 1999.
- [11] WARK, Keneth. Termodinámica. 2ª ed. México: Mc Graw Hill. 1996.
- [12] Avances técnicos CENICAFE: Utilice la energía solar para secar correctamente el café / Centro Nacional de Investigaciones del Café.. No 281 (nov 2000). Chinchina: CENICAFE, 2000. 4p. SIN-0120-0178.
- [13] Virtual library of the Food and Agriculture Organization of the United Nations en [http:// www. Fao.org](http://www.Fao.org).