

## **“OPTIMIZACION DE UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA SECADO DE LÚCUMA EN AYACUCHO”**

JANAMPA QUISPE, Kléber; CERÓN BALBOA, Octavio; CORTEZ LEDESMA, Nicolás Eusebio; ORÉ GARCÍA, Julio; MONTES DE OCA ALCARRAZ, Ciro; MORALES MORALES, Oswaldo.

Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil  
Programa de investigación de Energías Renovables

### **RESUMEN**

Se presenta el diseño, construcción y evaluación de un secador solar cuya característica es su adaptabilidad de secador solar mixto a secador indirecto para el secado de lúcuma (lúcuma ovobata H.P.K), dimensionado bajo los modelos matemáticos de colectores planos de aire. El secador consta de una placa colectora de  $0.56\text{m}^2$ , con doble cubierta de vidrio. La evaluación del secado de la lúcuma se realizó de acuerdo al método gravimétrico, lográndose un producto con un 66% de pérdida de su masa inicial. En el caso de secado mixto, la eficiencia del secador alcanzó el valor de 45% a la temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  del aire a la salida del colector. En el secado indirecto se encontró una eficiencia del secador de 24% a la temperatura de salida del aire a  $40^{\circ}\text{C}$ . Las características organolépticas no presentan una alteración significativa en su olor y color característico.

**Palabras clave:** *secado solar mixto-indirecto, lúcuma*

## **“OPTIMIZATION OF A PROTOTYPE OF SOLAR DRYER FOR DRIED OF LÚCUMA IN AYACUCHO”**

### **ABSTRACT**

One presents the design, construction and evaluation of a solar dryer which characteristic is your adaptability of solar mixed dryer to indirect dryer for the dried one of lúcuma

(lúcuma ovobata H.P.K), measured under the mathematical models of flat collectors of air. The dryer consists of a plate colectora of 0.56m<sup>2</sup>, with double cover of glass. The evaluation of the dried one of the eggplant was realized in agreement to the method gravimétrico, a product being achieved by 66% of loss of his initial mass. In case of dried compound, the efficiency of the dryer reached the value of 45 % to the temperature of 60°C of the air to the exit of the collector. In dried indirect one found an efficiency of the dryer of 24% to the temperature of exit of the air to 40°C. The characteristics organolépticas do not present a significant alteration in your smell and typical color.

**Keywords:** Dried mixed - indirect lot, lúcuma.

## **INTRODUCCIÓN**

El departamento de Ayacucho es el cuarto productor nacional de lúcuma con el 3% de la producción nacional (Ministerio de Agricultura-Ayacucho), sin embargo el proceso post cosecha de la lúcuma se realiza en forma artesanal, se transporta en costales, se seleccionan y compran en sazón. Luego pelan, pican y secan; secan en canastas, plásticos, mantadas y se expone la intemperie en una azotea o la calle. El proceso de secado dura 3 días aproximadamente. Lo que genera una lúcuma procesada de baja calidad por malas prácticas de manufacturas en el proceso de secado, producción de harina y uso de diferentes biotipos de lúcuma.

El incremento de la demanda de productos relacionados a los subproductos de lúcuma, exige una mejor calidad de la lúcuma procesada lo que significa mejorar las técnicas de la producción, de la cosecha y post cosecha de la fruta.

En la Universidad Jorge Basadre Grodman de Tacna, se investigó el secado de lúcuma en un secador solar técnico mixto de cabina<sup>(1)</sup>, así mismo se han desarrollado diversos tipos de técnicas de secado y secadores, como un deshidratador solar-eléctrico y obtención de harina de lúcuma (Lúcuma abovata H.B.K.) en Huánuco 1982.

En el presente trabajo de investigación se diseña un secador solar para lúcuma, la característica esencial del módulo es su adaptabilidad de secador solar mixto a secador

indirecto con un control de la entrada del aire para regular la temperatura de secado. El resultado del secado de lúcuma, se evaluó mediante el método gravimétrico que determina la pérdida de masa en intervalos de tiempo de media hora. Encontramos que el secado de la lúcuma (66.7% de humedad en base húmeda), alcanza luego de 3.5 a 4.5 horas una pérdida de masa del 66% para el secado mixto e indirecto respectivamente.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1. METODOS**

#### **1.1 Diseño y construcción del prototipo de secador solar**

El diseño del prototipo de secador solar se determina teniendo en cuenta <sup>(2)</sup>

- a- Las características geográficas y del clima de la ciudad de Ayacucho.
- b- Se elige el tipo de secador en base a las propiedades del producto (lúcuma).
- c- A través de un balance energético y de masa se dimensiona sus parámetros geométricos y térmicos: teniendo en cuenta la cantidad de producto a secar (1.2kg).

#### **1.2 Evaluación del secado de la lúcuma**

La evaluación del producto se basa en el método estático de aproximación gravimétrica; en la que se determina la diferencia de masa debido a la pérdida de humedad <sup>(1)(3)</sup>

1ro. Determinamos la masa seca de una muestra del producto a una temperatura de 105° C en el Moisture Analyzer.

2do. Se realiza el secado de muestras semejantes, tanto en el secador solar como al aire libre. Durante el secado del producto, se registra la pérdida de masa del producto durante intervalos de tiempo de media hora.

3ro. En base al Protocolo de evaluación de colectores solares (RICSA-CYTED), se determina la eficiencia del colector y eficiencia de secado.

## **2. MATERIALES E INSTRUMENTOS**

### **Materiales:**

- Vidrio común de ventana.
- Triplay
- Pintura negro mate
- Plancha de tecnopor
- Placa metálica de hierro
- Silicona
- Accesorios, herramientas y otros.

### **Instrumentos:**

- Secador Moisture Analyzer (MS-70) de sensibilidad 0.001g.
- Radiómetro
- UNI-100mV  $\approx 1000\text{W/m}^2$ . Lectura mínima multímetro:  $10\text{ W/m}^2$
- Termocuplas: Cobre – Konstantan. Lectura mínima en el multímetro:  $1\text{ }^\circ\text{C}$
- Anemómetro: De copas giratorias. Lectura mínima  $0.5\text{ m/s}$ .
- Multímetro digital.
- Sensores de humedad y temperatura

## **RESULTADOS**

### **1. CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DEL PROTOTIPO**

#### **1.1 Determinación de la Curva de Humedad de la Lúcumá (Lúcumá Ovobata H.P.K)**

La masa seca de un producto se considera la masa a  $105\text{-}108^\circ\text{C}$  <sup>(4)</sup> temperatura en la que el producto no pierde sus propiedades características. Para determinar la masa seca

de la lúcuma (0.685g) se fijó en el Analizador la temperatura de 105° C. La pérdida de humedad de la lúcuma resultó de 65.59% durante un tiempo aproximado de 37 a 40 minutos, tiempo en el cual alcanza su masa seca de 0.228g. El contenido de humedad de la lúcuma en base húmeda (Wh) resulta 66.7% a 21° C y 39% de humedad relativa del medio ambiente. Encontramos que dicho resultado es muy próximo al determinado en el secado Solar Técnico de Lúcuma-2000<sup>(1)</sup> correspondiente al 66.5% de contenido de humedad de la lúcuma; logrando además un resultado de humedad en el producto seco de 9.26 % (base húmeda)

## **1.2 Diseño del requerimiento energético y área del colector**

Se diseña un secador con colector plano de aire que pueda adaptarse a funcionar como secador mixto y secador indirecto. Se utiliza el Software GRAPSI-DRAW para la elaboración de la carta Psicrométrica para Ayacucho a 2761msnm. Para dimensionar las características térmicas y geométricas del colector, tanto para el caso de secador indirecto como mixto, asumimos la temperatura ambiente de 16.1°C, humedad relativa de 65.5% e intensidad de radiación solar media 700W/m<sup>2</sup>.

### **Secador solar indirecto**

Consideramos la temperatura de calentamiento del aire hasta 40° C, para luego de enfriarse adiabáticamente hasta 18°C, logrando tener una capacidad de remoción de agua de 8.7g de agua/kg de aire.

### **Secador solar Mixto**

El secado mixto, permite aumentar la capacidad remoción de agua con un mejor control del proceso<sup>(5)</sup>, en cuanto a la velocidad del flujo de aire y temperatura. El aire se calienta hasta 55°C y se enfría hasta los 40° C logrando tener una capacidad de remoción de agua de hasta 51g de agua/kg de aire.

El área determinada del colector solar resulta  $0.56\text{m}^2$  como secador mixto y  $0.31\text{m}^2$  como secador indirecto, con eficiencia estimada de un 40%.

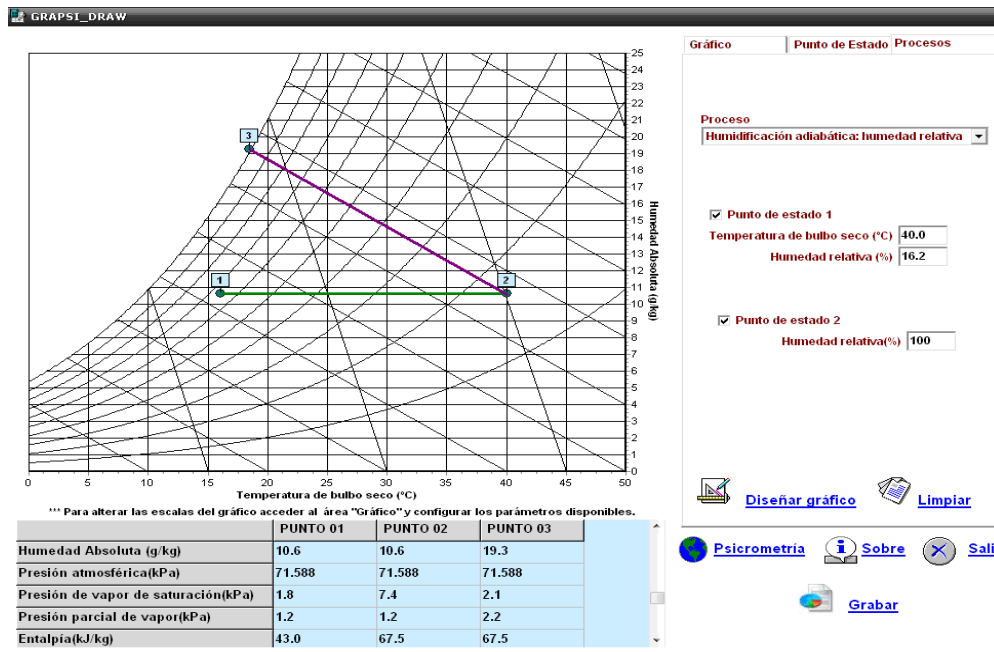


Figura 1: Curva Psicrométrica del proceso que sigue el aire durante un secado indirecto de la Lúcumá

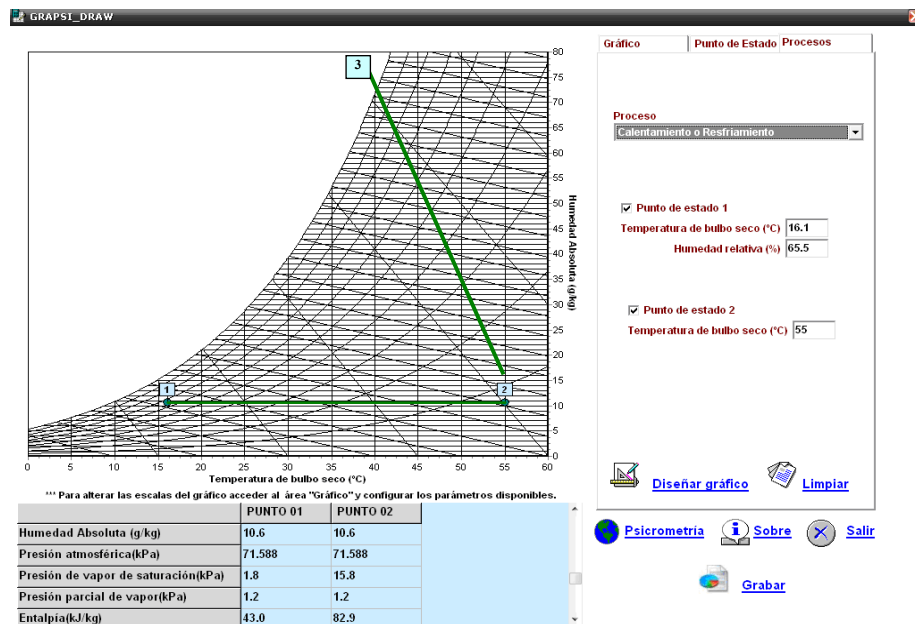


Figura 2: Curva Psicrométrica del secador mixto

### 1.3 Determinación del coeficiente global de pérdidas del colector y del factor de remoción del colector solar

En base al análisis anterior, dimensionamos un colector plano con una base metálica pintada de negro mate y una cubierta de dos vidrios para aumentar la temperatura interior.

Para caracterizar el coeficiente global de pérdidas del colector, que nos indica la cantidad de energía que pierde al medio ambiente, nos basamos en el modelo planteado por J.M Chassériaux<sup>(6)</sup>.

El coeficiente global de pérdidas del colector plano corresponde a  $8.1 \text{ W/m}^2\text{C}$ , determinado cuando este funciona sin carga, alcanzando una temperatura del aire de salida de  $51.2^\circ \text{C}$  con un factor de remoción de aire de 0.4. Lo que nos indica que hay un 40% de eficiencia en la transmisión de calor del colector al aire.

Tabla 1: Determinación del coeficiente global de pérdidas del colector

Longitud	L	1	m
ancho	l	0.964	m
emisividad del vidrio	$\epsilon_v$	0.9	
coeficiente de transmisión del vidrio	t	0.9	
coeficiente de reflexión del vidrio	$\rho$	0.1	
coeficiente de absorción del absorbedor	a	0.88	
emisividad del absorbedor	$\epsilon_c$	0.1	
separación entre el vidrio y el absorbedor	d	0.1	m
espesor de la aislamiento posterior	e	0.04	m
espesor de la aislamiento lateral	$e_l$	0.04	m
conductividad térmica del aislante	$k_i$	0.1037	$\text{W/m}^2$
temperatura de entrada del aire	$T_{fi}$	31	$^\circ\text{C}$
Caudal másico	m	0.01	$\text{Kg/s}$
Temperatura ambiente	$T_a$	27	$^\circ\text{C}$
Viscosidad	u	0.000020440	$\text{Kg/ms}$
conductividad del aire	$k_i$	0.0287	$\text{W/mK}$
Calor específico	$c_p$	1007.9	$\text{KJ/KgoK}$
Radiación	G	700	$\text{W/m}^2$
Coeficiente global de pérdidas	U	8.1	$\text{W/m}^2\text{C}$
Calor extraído por unidad de tiempo	$q_u$	203.7	W
Factor de remoción del aire	$F_R$	0.4	
Temperatura final del aire	$T_{fo}$	51.2	$^\circ\text{C}$
Eficiencia instantánea	n	0.5	

## 1.4 Aspectos geométricos.

### a- Dimensiones

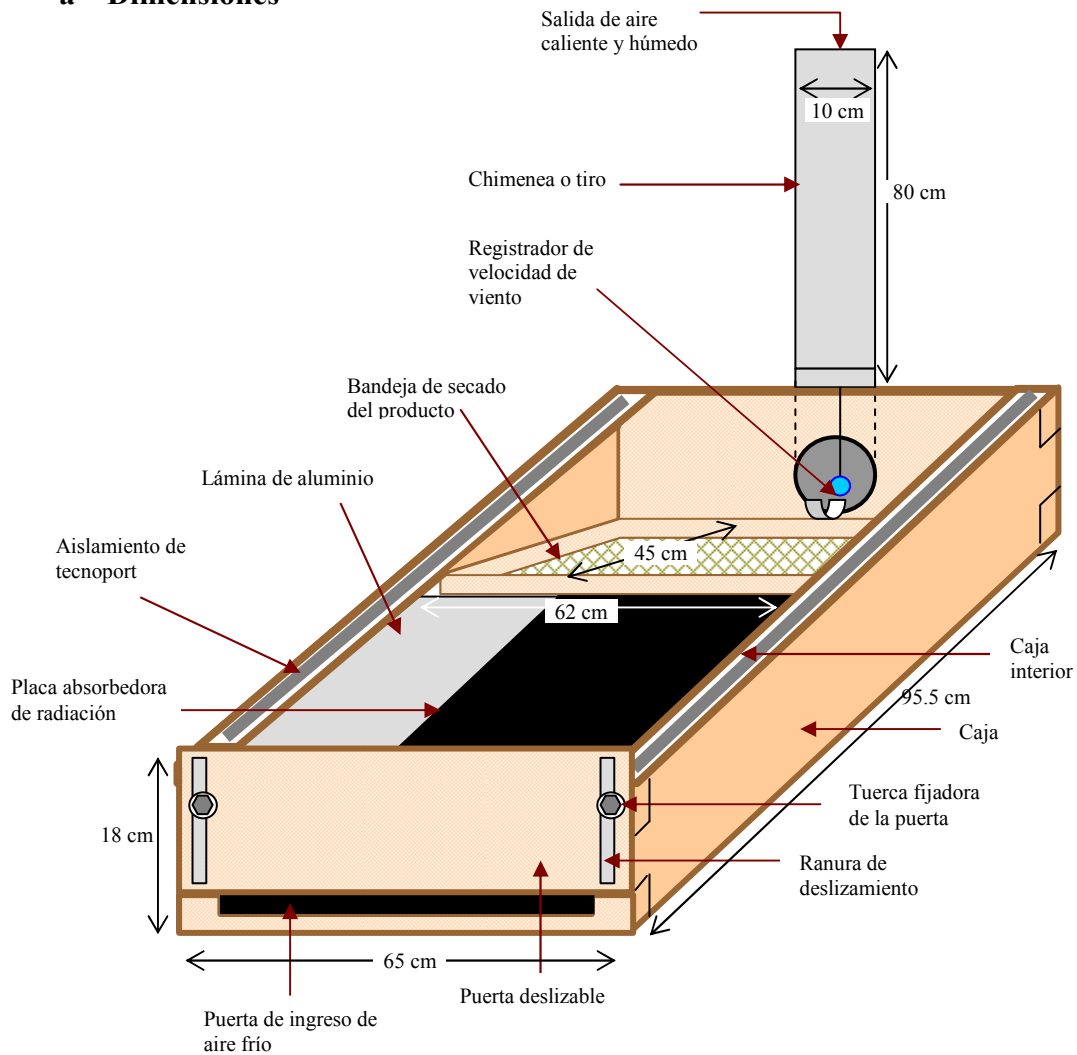


Figura 3: Diagrama de secador solar mixto-indirecto

### b- Montaje final



Figura 4: Acabado del secador solar mixto-indirecto

## 2. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EFICIENCIA DEL SECADOR SOLAR

### 2.1 Eficiencia del colector

En base a los protocolos de evaluación de colectores solares, se orienta el colector al norte con un ángulo de inclinación de  $13^\circ$  correspondiente a la latitud local. Se evalúa la temperatura de entrada y salida del aire sin carga y sin reorientación del colector. La eficiencia instantánea del colector respecto a la diferencia de temperatura de entrada del aire y el medio ambiente se ilustra en la figura 5.

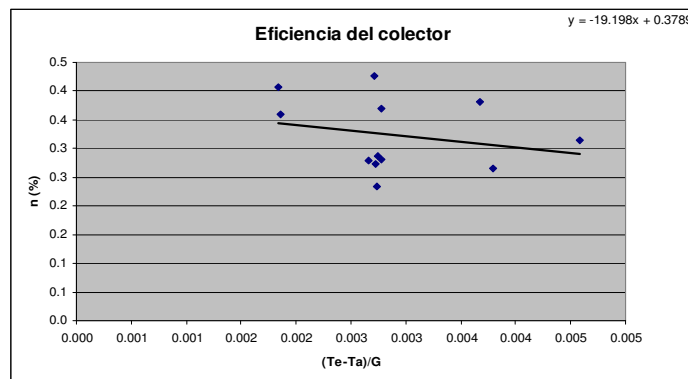


Figura 5: Curva de eficiencia instantánea del colector

Conociendo la eficiencia óptica del colector correspondiente a los vidrios de la cubierta  $(\alpha\tau)_e = 0.8$ , determinamos el factor de remoción ( $F_R$ ) 0.47 y el coeficiente global de pérdidas ( $U_c$ )  $40.53 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

### 2.2 Pérdida de masa

#### Secador mixto

En el secador solar, la temperatura media del aire a la entrada de la bandeja del producto fue de  $44^\circ\text{C}$  y a la salida  $50^\circ\text{C}$ , alcanzando en algunos casos valores de  $60^\circ\text{C}$ .

Se compara con el secado del producto al aire libre.

Tabla 2: Resultados comparativo del secado de la lúcuma en el secador mixto y al aire libre

	Secador mixto	Secado al aire libre
masa inicial (g)	308.4	205.6
masa seca (g)	102.7	68.4
masa de agua evaporada (g)	205.8	137.1
tiempo de secado (h)	3.5	5.0

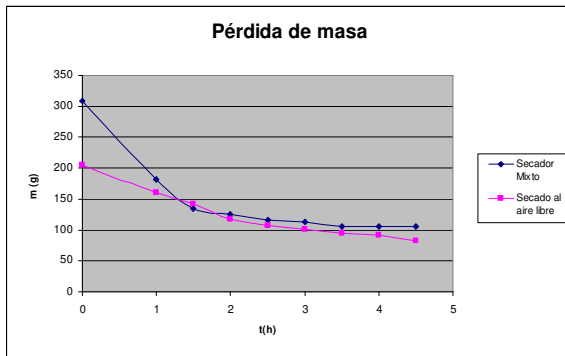


Figura 6: Pérdida de masa de la lúcuma durante el secado en el prototipo de secador mixto y al aire libre.

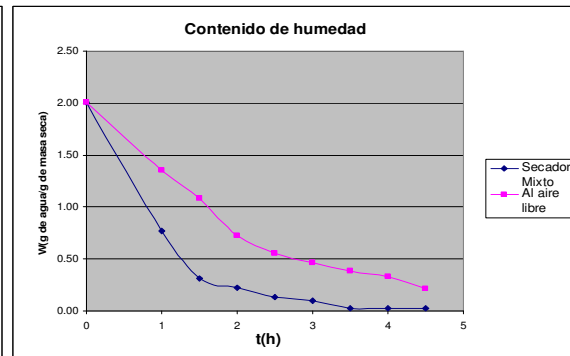


Figura7: Disminución del contenido de humedad libre de la lúcuma en el secador y al aire libre

En el secador solar mixto hay una pérdida de masa más rápida durante las primeras horas de secado, que en el secado al aire libre. Ello podría indicarnos que es en el secador mixto que pasa más rápidamente a su segunda y tercera fase de secado donde se hace estable. Hecho que mejor se ilustra en el gráfico de la pérdida de humedad Figura 7; se observa que la pérdida de humedad libre del producto es más rápido en el secador mixto y éste alcanza en menor tiempo su fase estable, donde la pérdida de humedad es muy pequeña.

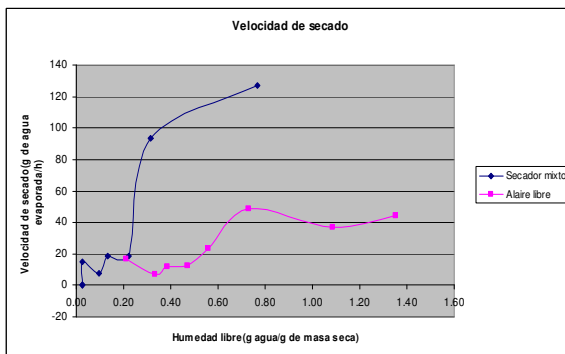


Figura 8: Velocidad de secado

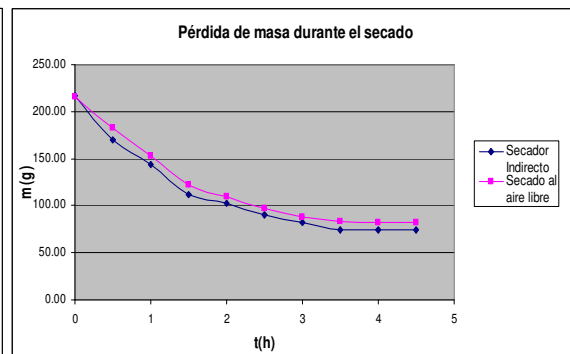


Figura 9: Pérdida de masa de la lúcuma durante el secado en el prototipo de secador indirecto y al aire libre

La figura 8 muestra la tendencia del comportamiento característico de la velocidad de secado; para el caso del secador solar mixto, durante las primeras horas el producto pierde su humedad libre de 0.8 a 0.4 g agua/ g de masa seca casi a una velocidad constante.

La **eficiencia del secadero**, evalúa conjuntamente el funcionamiento térmico del sistema de secado, incluyendo la eficiencia del captador y de la cámara de secado. Determina la eficiencia de la energía solar incidente utilizado en el secado que para nuestro caso está entre 45% y 30% para 1.5h y 3.5h de secado respectivamente. Valores que están en el rango habitual de 10-50% <sup>(7)</sup>

### **Secador Indirecto**

La temperatura media del aire a la entrada de la bandeja del producto fue de 48°C y a la salida 43°C.

Tabla 3: Resultados comparativos del producto en secado Indirecto y al aire libre

	Secador Indirecto	Secado al aire libre
masa inicial (g)	216.9	216.3
masa seca (g)	72.2	72.0
masa de agua evaporada (g)	144.7	144.3
tiempo de secado (h)	4	6.0

En este caso, el área de entrada de aire al colector solar ha sido el doble del utilizado como secador mixto, para poder controlar la temperatura de secado mediante mayor flujo de aire.

Las gráficas nos ilustran la escasa ventaja que presenta el secador solar, cuando funciona como secador indirecto, en relación al secado al aire libre. Sin embargo, el producto obtenido en el secador resultó ser más homogéneo en color y secado, en el caso del producto al aire libre se notaba flexible lo que implicaba mayor tiempo de secado.

La **eficiencia del secadero** solar indirecto está entre 24% y 20% para 1.5h y 3.5h de secado respectivamente.

## DISCUSIÓN

El diseño del prototipo de secador solar propuesto, tiene la posibilidad de ser utilizado tanto como secador solar mixto como indirecto. Lo que se logra cubriendo con un material opaco parte del vidrio del colector de manera que no incidan directamente los rayos del sol sobre el producto. El control de flujo de aire, con la que se controla la temperatura de calentamiento del aire, lo hacemos mediante la variación del área de entrada del aire. No obstante las condiciones climáticas cambiantes de evaluación, encontramos una concordancia entre los parámetros térmicos del colector dimensionado para una carga de lúcuma de 1.2 Kg y los resultados experimentales, de manera que los parámetros térmicos característicos del colector solar para un área de entrada del aire de la  $0.03\text{m}^2$ , son los siguientes:

Tabla 4: Parámetros térmicos del colector del secador solar

Factor de remoción del aire	$F_R$	0.40	
Coeficiente global de pérdidas	$U_L$	40.53	$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$
Eficiencia media	$\eta$	31	%
Temperatura ambiente	$T_a$	24	$\text{°C}$
Humedad relativa	$H_r$	56	%
Área del colector	$A$	0.57	$\text{m}^2$
Área de la bandeja	$A_b$	0.27	$\text{m}^2$

El contenido de humedad de la lúcuma para las condiciones medio ambientales locales ( $21\text{°C}$  y 39% de humedad relativa) resulta 66.7% en base húmeda, resultado similar al determinado en la Universidad Jorge Basadre Grodman de Tacna 2000 <sup>(1)</sup> 66.5% .

El secado de la lúcuma, se realizó a una intensidad media de la radiación solar de 700-800W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 20°C-26°C, velocidad de viento externo de 0.4m/s y humedad relativa del 56%.

En el secado mixto, se encuentra una pérdida de masa del producto del orden del 60% durante 1.5 horas, mostrando una rápida pérdida de la humedad libre del producto de 2.00 a 0.37 g de agua/ g masa seca . Al cabo de 3.5 horas encontramos una pérdida de masa de 66%, lo que indica que esta masa corresponde a su masa seca aproximadamente. La temperatura del aire de salida del colector estaba en el orden de 50- 60° C, temperaturas altas en comparación al obtenido en el Secador Solar Técnico en Tacna <sup>(1)</sup>, lo que podía comprometer las propiedades del producto que podía notarse organolépticamente en su coloración blanquecina del lado del producto que daba directamente al sol.

Tabla 5: Resultados comparativo del secado de la lúcuma en el secador mixto y al aire libre

	Secador Mixto	Secado al aire libre
masa inicial (g)	308.4	205.6
masa seca (g)	102.7	68.4
masa de agua evaporada (g)	205.8	137.1
tiempo de secado (h)	3.5	5.0
Temperatura del aire de entrada (° C)	44	---
Temperatura del aire de entrada (° C)	50-60	---

En el secado indirecto de la lúcuma, se muestra una pérdida de masa del producto del orden del 52% durante 1.5 horas, mostrando una rápida pérdida de la humedad libre del producto de 2.00 a 0.55 g de agua/ g masa seca en dicho intervalo. Luego de 4 horas efectivas la pérdida de masa en vapor de agua correspondía a un 66%. La temperatura del aire de salida del colector estaba en el orden de 40-43° C. El producto seco mostraba organolépticamente un color más amarillento que el secado mixto.

En el caso del secado al aire libre, podemos establecer que en el tiempo que se obtiene una masa seca en los secadores; la pérdida de humedad de la lúcuma al aire libre

correspondía a un 56%, lo que muestra que requería mayor tiempo de secado, pues en esta fase decreciente hay una disminución de la velocidad de secado.

Tabla 6: Resultados comparativos del producto en secado Indirecto y al aire libre

	Secador Indirecto	Secado al aire libre
masa inicial (g)	216.9	216.3
masa seca (g)	72.2	72.0
masa de agua evaporada (g)	144.7	144.3
tiempo de secado (h)	4	6.0
Temperatura del aire de entrada (o C)	48	---
Temperatura del aire de entrada (o C)	40-43	---

En la apreciación de aspecto referido al color del producto seco encontramos que el secado indirecto es igualmente apreciado que el secado al aire libre, por lo que muestran una coloración amarillo intenso. En la apreciación olfativa que destaca el olor característico de la lúcuma, encontramos que el secado mixto es igualmente apreciado que el secado al aire libre, y en la apreciación gustativa se muestra que la lúcuma secado de modo mixto resulta ser más apreciado.

Debe resaltarse que no se aprecian los aspectos de contaminación, salubridad y rapidez de secado.

## CONCLUSIONES

1. El prototipo de secador solar para lúcuma se caracteriza por ser un secador mixto-indirecto, que presenta una eficiencia de 30 a 40% del colector plano con doble cubierta de vidrio y área efectiva de  $0.57\text{m}^2$  y  $0.31\text{m}^2$ . El factor de remoción de aire ( $F_R$ ) es 0.4 y el coeficiente global de pérdidas del colector ( $U_c$ ) es  $40.53\text{ W/m}^2\text{°C}$ .
2. Se determinó que la lúcuma tiene una humedad 66.7% en base húmeda, para una temperatura ambiente de  $21^\circ\text{C}$  y humedad relativa de 39%.
3. El secado de la lúcuma mediante el secador funcionando en una condición mixta, ha permitido secar una muestra de 0.3Kg en 3.5h a una temperatura promedio de

entrada del aire de 44°C y temperatura promedio de salida de 50°C, el funcionamiento térmico del sistema de secado logra una eficiencia del 45% en las primeras horas de secado a 30% finales.

4. El secado de la lúcuma, en el secador solar en la condición de secador indirecto, ha logrado secar una muestra de 0.216 Kg., de delgadas hojuelas de 2mm de espesor; en un tiempo de 4h en la que el producto pierde un 66% de humedad mediante un flujo de aire de entrada a una temperatura promedio de 48°C y temperatura de salida promedio de 43° C. La eficiencia del secadero indirecto es en este caso menor que el del secador mixto es de 20 a 24%.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) DE FLOIRO y otros (2000) Secador Solar Técnico de Lúcuma. UNJBG
- (2) DELGADO,E ; PERALTA, J; BARRIGA, A. (2005) Secadores Solares - Térmicos Para Granos y Frutas Para Utilizarlo en Zonas Remotas. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Guayaquil-Ecuador.
- (3) PITA, D.; ROJAS, O. (2001) Determinación del contenido de humedad de equilibrio del pseudotallo del plátano. TECNOLOGÍA QUÍMICA Vol. XXI, No.1.
- (4) GARCÍA, S.V.; SCHMALKO, M.E. ; TANZARIELLO, A.(2007) Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones . INTA, Argentina
- (5) ROMÁN, R.; FERRANDO, M.C. et all. (2008). El Secado Solar: Desde aspectos Fundamentales hasta la Práctica. Corporación EcoMaipo.
- (6) MONTERO, I (2005) Modelado y construcción de un secador solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral Badajoz.
- (7) ABDALA, J.L, FONSECA, S. GEN, A.(2003) Secado de café pergamino en secadores solares multipropósito y de tambor rotatorio. Centro de Investigaciones de Energía Solar