

Evaluación del desempeño de un secador operado con energía solar y biogás para remoción de humedad en granos de café

Cindy Elizabeth Gonzales Zúniga

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del desempeño de un secador operado con energía solar y biogás para remoción de humedad en granos de café

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Cindy Elizabeth Gonzales Zúniga

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2016

Evaluación del desempeño de un secador operado con energía solar y biogás para remoción de humedad en granos de café

Cindy Elizabeth Gonzales Zúniga

Resumen. El funcionamiento de los secadores solares se fundamenta en el aprovechamiento de la temperatura ambiental y la radiación solar. El rango de temperatura requerido para el secado eficiente del grano de café es de 40 a 60 °C. La implementación de un secador híbrido que integre el biogás como fuente energética representa una alternativa para el mantenimiento de los procesos de secado incluso en horarios donde no se cuenta con disponibilidad de radiación solar. Asimismo, incentiva a la industria del procesamiento de café a adoptar la tecnología de biodigestores para el tratamiento de sus residuos. Se evaluó el desempeño de un secador híbrido operado con el biogás generado en el digestor de ganado porcino de Zamorano. Se realizó la comparación de eficiencias de remoción de humedad en grano de café y temperaturas alcanzadas entre un secador solar y el modelo híbrido. La remoción de humedad del grano de café, evaluada mediante tres ensayos aplicados en el secador solar e híbrido, mostró tiempos de remoción para el secador solar de 58, 36 y 49 horas alcanzando temperaturas promedio hasta de 41 °C, y de 4, 5 y 6 horas, para el secador híbrido, alcanzando temperaturas promedio hasta los 66 °C. El sistema híbrido mostró una eficiencia del 90% en tiempo de secado y alcanzó mayores temperaturas en el interior de la cámara de secado.

Palabras clave: Biogás, desempeño de secadores, remoción de humedad, secador híbrido.

Abstract. The operation of solar dryers is based on the utilization of ambient temperature and solar radiation as an energy source. The appropriate range of temperature for the efficient drying of coffee grains is between 40-60 °C. The implementation of a hybrid dryer that integrates biogas as an energy source, represents an alternative for the maintenance of drying processes even at times when solar radiation is not available. It could also encourage the adoption of biodigesters as a technology for waste treatment within the coffee processing industry. The performance of a hybrid dryer operated with the biogas produced in the biodigester at the pig farm of Zamorano was evaluated. A comparison of moisture removal efficiencies at coffee beans and the temperatures reached between the solar dryer and the hybrid model was performed. The moisture removal of the coffee grains was evaluated using three trials in both dryers; removal in the solar dryer took 36, 49 and 58 hours reaching a mean temperature of 41 °C. On the other hand, mean temperature in the hybrid dryer was 66 °C. The hybrid system was 90% more efficient in drying time and it reached higher temperatures in its interior chamber.

Keys words: Biogas, dryer performance, hybrid dryer, moisture removal.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
4. CONCLUSIONES.....	16
5. RECOMENDACIONES.....	17
6. LITERATURA CITADA	18
7. ANEXOS	20

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

	Cuadros	Página
1.	Temperaturas (°C), en el secador híbrido respecto a horas funcionando con biogás, durante los días 26, 27 y 28 de septiembre del año 2016.....	11
2.	Evaluación del contenido de humedad inicial en el grano de café pergamino mediante el método de sólidos totales.....	12
	Figuras	Página
1.	Esquema del diseño del secador solar ubicado en el módulo de MIC-CC, vista de perfil y frontal	4
2.	Esquema de las dimensiones y materiales con los cuales se diseñó el secador solar	5
3.	Esquema de las dimensiones y materiales con los cuales se diseñó el secador híbrido	6
4.	Esquema de ubicación de los sensores de temperatura ibutton dattalogers en cada secador	7
5.	Vista frontal y lateral del secador híbrido	8
6.	Comportamiento de la temperatura registrada en el secador solar, a diferentes horas. Operado en vacío	9
7.	Temperatura en secador solar y radiación solar durante los días 14, 15 y 16 de agosto del 2016. Días previos a la realización de las pruebas de secado	10
8.	Comportamiento de la temperatura, registrada en el secador híbrido, a diferentes horas. Operado en vacío	11
9.	Influencia de la radiación solar sobre la temperaturas de la cámara de secado en el modelo híbrido.....	12
10.	Disminución del contenido de humedad en el grano de café pergamino, mediante tres ensayos en campo, durante los meses de agosto y septiembre utilizando el Secador solar de MIC-CC.....	13
11.	Disminución del contenido de humedad en el grano de café pergamino, mediante tres ensayos en campo, durante los meses de septiembre y octubre utilizando el Secador híbrido del módulo de Ganado Porcino.....	14
12.	Gráfico de caja de las temperaturas promedios de ambos secadores	15

Anexos	Página
1. Temperaturas de las bandejas en el secador solar MIC-CC.....	20
2. Secador híbrido operado con energía solar y biogás.....	21
3. Conexión del sistema de pilotos para la quema de biogás	22
4. Prueba de normalidad en las temperaturas del secador solar mediante el programa estadístico SPSS.....	22
5. Análisis estadístico ANDEVA en temperaturas del secador solar.....	22
6. Prueba de normalidad en las temperaturas del secador híbrido mediante el programa estadístico SPSS.....	23
7. Análisis estadístico ANDEVA en temperaturas del secador híbrido	23
8. Prueba de muestras independientes entre los datos de radiación en el secador solar, y el secador híbrido, durante los ensayos de secado en granos de café pergamino.....	23

1. INTRODUCCIÓN

El café se encuentra posicionado como el segundo producto de mayor importancia en la economía mundial. En la actualidad alrededor de 80 países lo producen y más de 50 países lo exportan, generando ingresos hasta de 15 mil millones de dólares por exportaciones cada año (Temis, López y Sosa, 2011). Honduras se ha posicionado entre los 10 mayores productores y exportadores de café a nivel mundial (Organización Internacional del Café [OIC], 2014). La actividad cafetalera en Honduras representa el 8.2% del PIB nacional y el 33.3% del PIB agropecuario (Rubial, 2014), generando ingresos por exportaciones hasta de US\$ 1,439,077,929 Instituto Hondureño del Café [IHCAFE], (2012). Gran parte de la población rural hondureña depende de la actividad cafetalera, aproximadamente el 90% de las fincas son de pequeña y mediana escala (no mayor a 5 hectáreas), con producción neta de 50 quintales en promedio (IHCAFE, 2011).

El procesamiento post-cosecha en el beneficio húmedo de café se inicia con la recepción de la cereza del café, el despulpe y remoción del mucílago, mediante procesos bioquímicos con la influencia de enzimas y microorganismos. Después se lleva a cabo el lavado con el fin de separar los granos de café del mucílago (Kleinwachter, Bytof y Selmar, 2015). Una vez que el grano ha sido lavado, se lleva a cabo la etapa de secado, considerada como la más crítica del proceso. El secado consiste en disminuir el contenido de humedad de 55% hasta valores menores del 12% de humedad, para lograr un almacenamiento libre de deterioros químicos y biológicos. Continuando con el trillado o descascarillado, es aquí donde se separa el café verde u oro del pergamino, para finalizar con el proceso de tostado y molido para su posterior comercialización (Vega y Castro, 2012).

La humedad es considerada como el factor más influyente en la calidad del grano de café pergamino, debido a que el contenido de agua en el grano es un medio para el crecimiento de microorganismos (hongos y bacterias) e insectos, causando daño físico y químico en el producto (Berrueta, Limón, Fernández y Soto, 2003). El secado se puede llevar a cabo de dos formas: secado natural al sol, utilizando patios de concreto; y secado artificial o mecánico, mediante secadores diseñados para esta actividad (Pineda, Fernandez y Oseguera, s.f). Los secadores solares son una alternativa aplicada en la industria alimentaria y agrícola para remover la humedad presente en diferentes productos. Además de su eficiencia, los secadores solares mejoran la calidad, evitan pérdidas por desperdicios, producto de un secado ineficiente y disminuyen los problemas ambientales (Daniel, 2007).

Los secadores solares se basan principalmente en el aprovechamiento de la irradiación solar, para procesos de secado y deshidratación de productos como frutas, ladrillos, madera y café (Mekhilef, Saidur y Safari, 2011). Es importante tomar en cuenta una serie de factores que influyen directamente en el desempeño adecuado de un secador solar, entre ellos; la

cantidad de producto que será secado, condiciones ambientales como el flujo de aire, radiación solar, temperatura y humedad relativa del lugar (Montero, 2005).

El rango de temperatura adecuado para llevar a cabo un proceso de secado sin afectar las características del grano de café es entre los 60–40 °C. Cuando el grano posee un contenido de humedad mayor a 30%, se aplica una temperatura de 60 °C para evitar la ocurrencia de procesos de fermentación que suelen ocurrir en humedad mayor a 40%. La temperatura de secado se reduce a valores entre 50 °C y 40 °C a medida que el porcentaje de humedad en el grano de café desciende, conservando de esta manera sus características organolépticas y evitando la pérdida de calidad (Taveira, Borém, Da Rosa, Oliveira, Giomo, Isquierdo y Fortunato, 2015).

La industria cafetalera genera una alta cantidad de residuos orgánicos principalmente la pulpa y el mucílago, por lo que la producción de biogás puede ser considerada una alternativa eficiente para el buen manejo de estos residuos. La implementación de biodigestores de digestión anaerobia contribuye a la reducción de emisiones y la generación de energía de fuentes renovables (Vega y Castro, 2012). El diseño de tecnologías apropiadas permitirá que el biogás sea reintegrado por los productores en el proceso de secado del café pergamino.

El uso del biogás en el diseño de tecnología de calentamiento, implica la implementación de sistemas de difusión conocidos como quemadores o mecheros. Los quemadores de gas convencionales se logran adaptar de manera fácil en la operación con biogás, cambiando la relación aire-gas. Estos dispositivos no exigen alto requerimiento en calidad del biogás, se debe alcanzar aproximadamente 8 a 25 mbar en la presión del biogás y controlar que los niveles de H₂S sean a 100 ppm para reducir oxidación en el equipo (Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011).

La innovación en los procesos de secado utilizando tecnologías híbridas ha sido aplicada en actividades específicas como el secado de rodajas de plátano maduro. Durante el período de 2005-2006 el Instituto de Ingeniería Agrícola de Bornim-Potsdam, Alemania, diseñó un secador solar reforzado con una fuente auxiliar que utilizó un depósito de agua para contrarrestar las condiciones meteorológicas poco favorables, almacenando energía en el agua durante el tiempo que había luz solar. Durante la noche, el sistema transfería el calor almacenado, en el agua al flujo de aire dentro del secador. Esto bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa para lograr un secado homogéneo del producto. Este secador se evaluó en el procesamiento de rodajas de plátano maduro, demostrando una capacidad de 30 kg de rodajas de plátano y removiendo la humedad del producto desde 82% a 18% en 8 h en un día soleado (Amer, Hossain y Gottschalk, 2010).

La escuela de Ingeniería Industrial en Badajoz, Extremadura, España, diseñó un prototipo de secador solar, evaluado en diferentes modos de operación (activos, pasivos, indirectos, mixtos e híbridos) para el secado de residuos agroindustriales. Este consistía en un colector plano, una cámara de secado de 1000×400×493mm, una chimenea de hierro, dos bandejas y un sistema de calentamiento adicional a través de resistencias. Las pruebas de funcionamiento se dieron durante los meses de febrero a septiembre del 2005. Cada experimento se llevó a cabo con una carga de 2 kg pulpa de olivo por cada bandeja

mostrando su mayor eficiencia en funcionamiento híbrido y mixto. Los resultados mostraron que los tiempos de secado más largos se obtuvieron durante el funcionamiento pasivo del secador solar, reduciendo hasta 50% estos períodos al operar de modo híbrido y modo mixto (Montero, Blanco, Miranda, Rojas y Celma, 2010).

El Centro de Tecnología y Desarrollo Rural de la India, desarrolló un estudio en secado sobre tres productos utilizando un secador híbrido (solar-biomasa). El dispositivo mantenía temperaturas de 54.9 °C durante horas del sol, debido a la radiación solar y temperaturas de 60 °C durante la noche debido al calor provisto por la quema de biomasa. Este sistema mostró un porcentaje de 83-84 % en la eficiencia de tiempo de secado, funcionando con la fuente auxiliar de calor por la quema de biomasa (Prasad y Vijay, 2005).

Las experiencias mostradas previamente indican que las limitaciones de un secador solar pueden ser solventadas mediante el diseño de un secador híbrido, que permita controlar las características del aire en el transcurso del tiempo de secado, principalmente en horas de la tarde-noche cuando no existe incidencia de radiación solar. Esto se puede realizar mediante la quema de biomasa u otra fuente externa de energía y protegiendo el producto de posibles deterioros físicos, químicos y biológicos (Amer, Hossain y Gottschalk, 2010). El diseño de tecnología híbrida facilitará la integración del biogás en los procesos productivos, impulsando de forma directa la implementación de medidas de mitigación ambiental a través de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano (CH₄), en el sector cafetalero.

El objetivo de este proyecto es la evaluación del desempeño de un prototipo de secador híbrido, compuesto por un colector solar y calentadores operados con biogás para el secado de café pergamino. Para ello, se propuso: i) comparar el desempeño del secador solar convencional e híbrido mediante el monitoreo de las temperaturas alcanzadas en las cámaras de secado, y ii) comparar la velocidad de remoción de humedad en granos de café pergamino utilizando ambas tecnologías.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio. El secador solar utilizado como prototipo se encuentra instalado en el módulo de Manejo Integrado de Cultivos y Cambio Climático (MIC-CC). El secador híbrido, en el cuál se enfocó el presente estudio, se encuentra en el Módulo de Ganado Porcino, específicamente donde se encuentra el biodigestor de donde se extrajo el biogás para el funcionamiento del mismo.

Diseño conceptual de secadores. El mecanismo de operación para ambos secadores requiere de la entrada de aire, que atraviesa el colector solar para incrementar su temperatura. El colector transfiere la energía obtenida por radiación solar, la cual provocaba un movimiento de convección natural en el aire, que posteriormente es desplazado hacia la cámara de secado a causa de la reducción en su densidad. Este mecanismo provoca la reducción de humedad del producto, transportando el vapor de agua fuera de la cámara de secado por una apertura ubicada en la parte superior del dispositivo. El producto se ubica en bandejas dentro de la cámara de secado Figura 1.

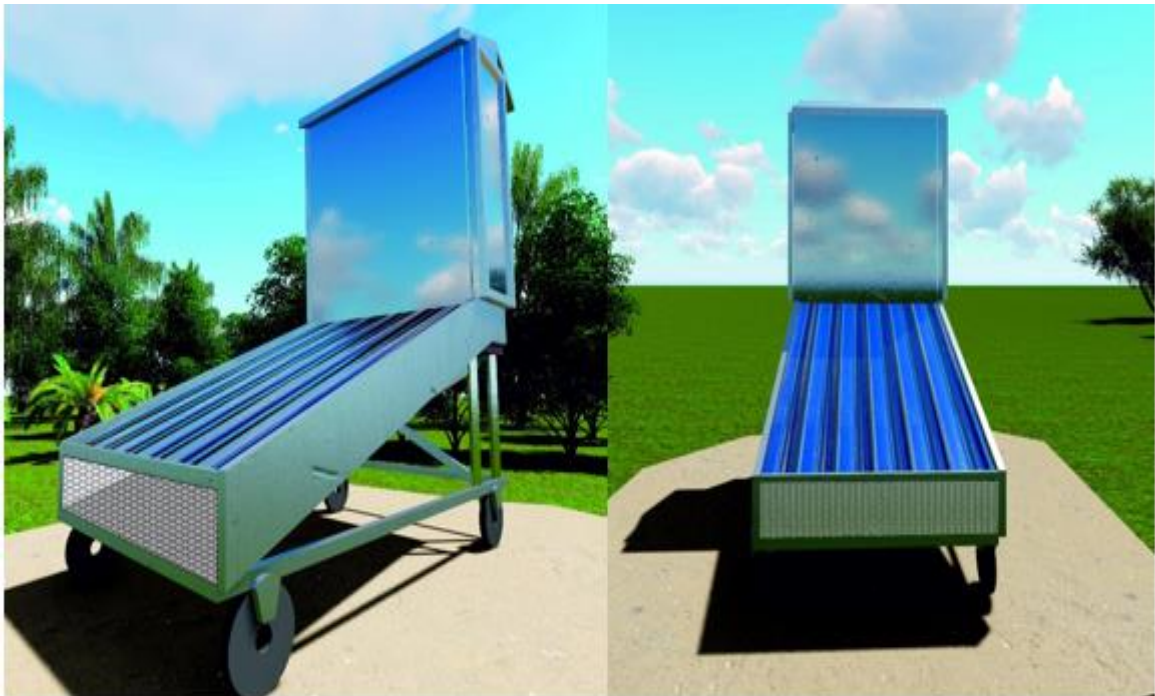


Figura 1. Esquema del diseño del secador solar ubicado en el módulo de MIC-CC, vista de perfil y frontal.

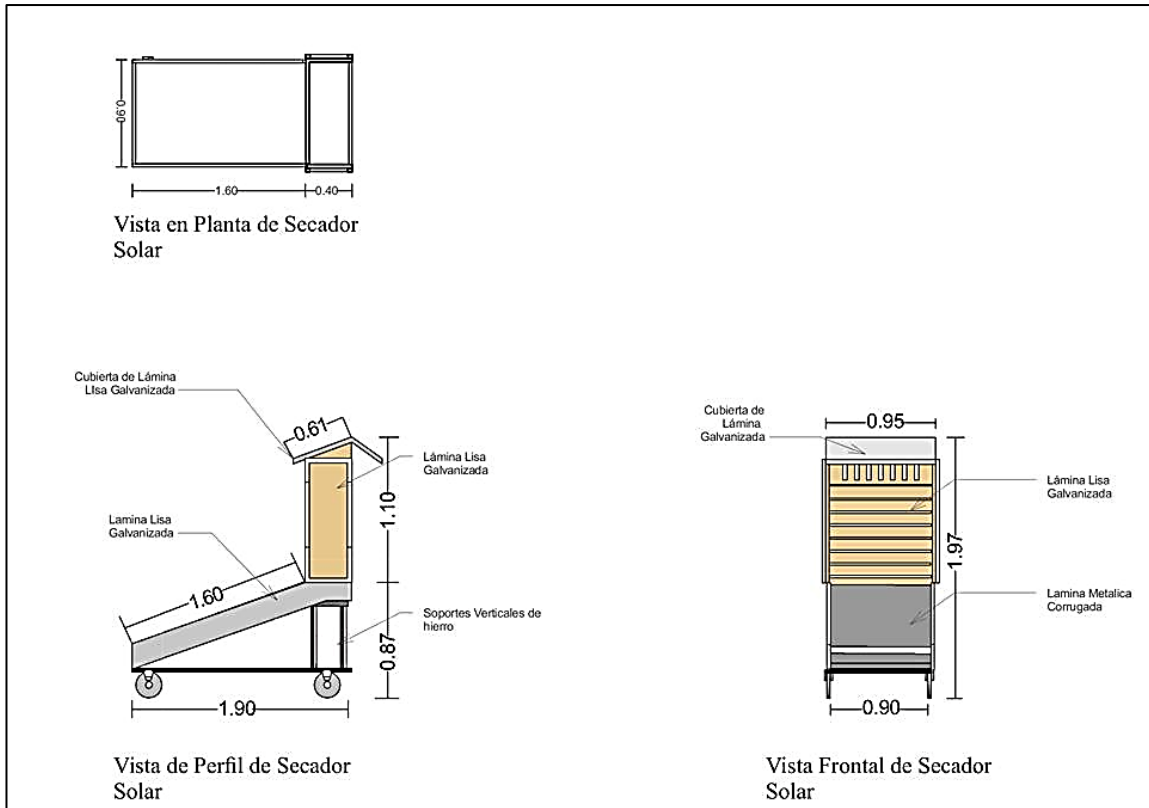


Figura 2. Esquema de las dimensiones y materiales con los cuales se diseñó el secador solar.

El secador solar fue diseñado por la Universidad de Cornell y consiste en una estructura de lámina lisa galvanizada de 1.97 m de altura por 1.90 m de largo por 0.95 m de ancho, con un techo a dos aguas y una cámara de secado con dimensiones de 1.10 m de alto por 0.40 m de ancho por 0.95 m de largo. En la parte inferior trasera de la cámara de secado cuenta con un colector solar, de lámina de caucho de 1.60 m de largo por 0.90 m de ancho y 0.20 m de alto específicamente para la entrada de aire. Finalmente este cuenta con 10 bandejas, cada una de 0.84 m de largo por 0.34 m de ancho, donde se colocó el café posteriormente evaluado Figura 2.

El diseño del secador híbrido fue desarrollado por el Centro Zamorano de Energía Renovable, aplicando el principio de operación del secador solar prototipo e incorporando un compartimiento paralelo al colector solar que funcionaba como cámara de transferencia de energía obtenida de los quemadores pilotos de biogás ubicados en la parte inferior del dispositivo. La conducción del calor en la cámara de ingreso de aire se realiza mediante el calentamiento de una lámina metálica que permanece en contacto con las llamas de los quemadores durante su operación Figura 3. Adicionalmente, se integra al sistema un extractor de aire en la parte superior de la torre de secado, manteniendo un flujo continuo de aire en el sistema y favoreciendo el proceso de secado a través del arrastre de humedad por convección. El extractor es alimentado con energía fotovoltaica y la velocidad del aire caliente en la torre se regula mediante una compuerta interna Figura 4.



Figura 3. Vista frontal y lateral del secador híbrido.

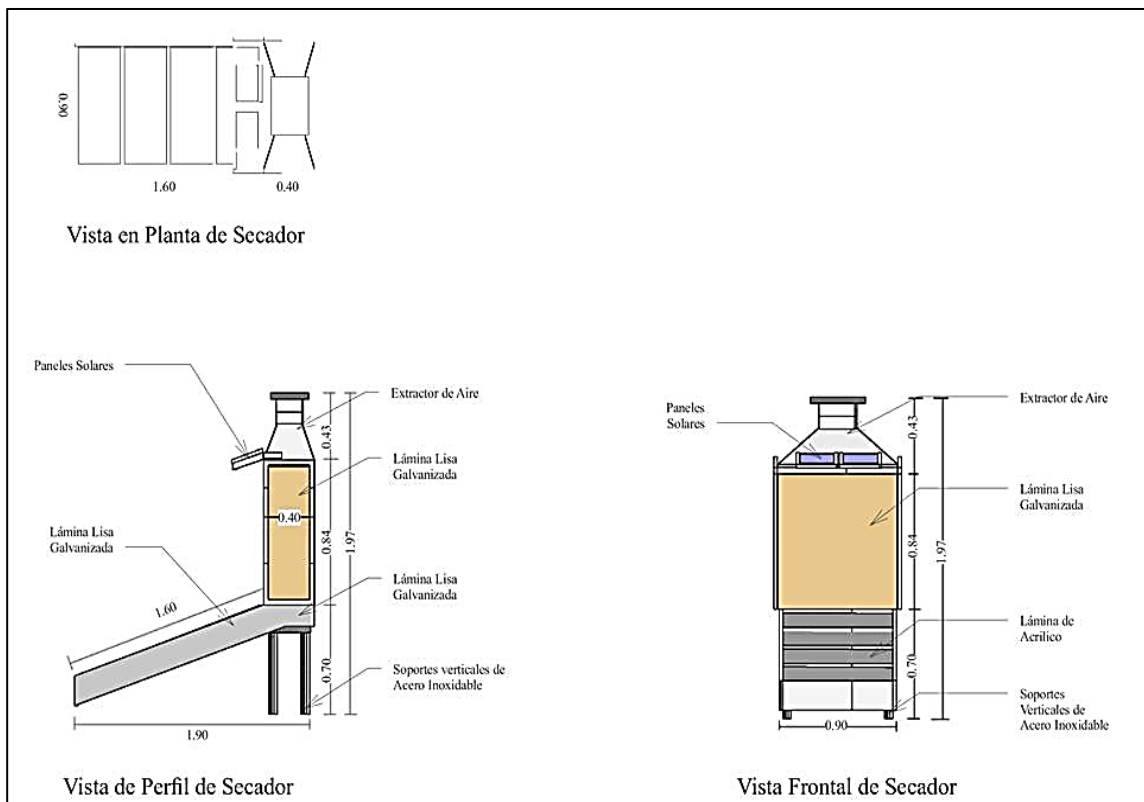


Figura 4. Esquema de las dimensiones y materiales con los cuales se diseñó el secador híbrido.

Operación y desempeño de secadores. Un secador eficiente deberá mantener un rango de temperatura homogéneo en el interior de la cámara de secado. Esto para asegurar que la remoción de humedad se realiza a la misma velocidad en todos los puntos, garantizando la calidad del producto final. Asimismo, es deseable que se encuentre dotado de dispositivos que permitan controlar la temperatura para asegurar las condiciones requeridas en cada proceso de secado. Para determinar la variabilidad en temperaturas de las diferentes bandejas en ambos secadores, se realizó el monitoreo de esta variable en vacío y durante el proceso de secado de granos de café. Para ello se utilizaron sensores “ibuttons 1-wire F50 MicroCan dattalogers” que permitieron el registro constante de temperatura a intervalos de 15 minutos. Los datos de temperatura fueron posteriormente descargados y tabulados.

Se evaluaron las variaciones de temperatura en el secador solar y en el secador híbrido respecto a las horas con sol, por medio de la supervisión de cada uno de los cinco sensores instalados en la cámara de secado como lo indica la Figura 5, Se realizó la comparación de la temperatura alcanzada en ambos secadores y la varianza entre las diferentes bandejas durante los períodos de operación.

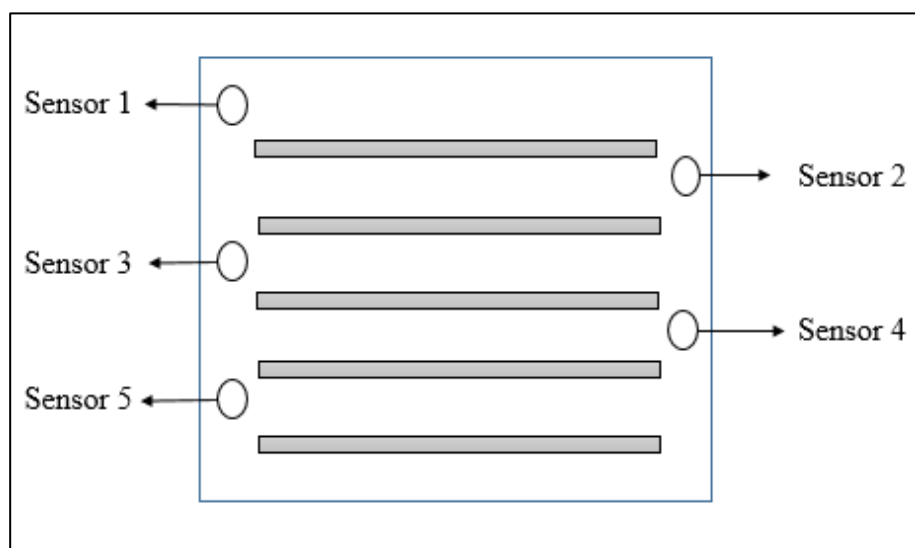


Figura 5. Esquema de ubicación de los sensores de temperatura ibutton dattalogers en cada secador.

Desempeño durante el secado de granos. En la evaluación del desempeño de ambos secadores, se utilizó café arábigo en pergamino obtenido de un proceso tradicional de beneficio húmedo de café, ubicado en el municipio de San Lucas, departamento de El Paraíso, a 1,400 msnm, con una temperatura promedio de 22 °C. Se recolectó una muestra de 14 lb, la cual se mantuvo preservada en el laboratorio, bajo condiciones de congelación en bolsas con cierre hermético durante un período de cuatro meses.

Se realizaron tres ensayos de humedad en cada modelo de secador, utilizando 1.5 lb de café para cada ensayo. El café fue distribuido de manera uniforme en cinco bandejas, colocando 0.136 lb por bandeja. Para medir evaluar la velocidad de secado del producto, se registró la

pérdida de humedad en el grano, tomando muestras a diferentes intervalos de tiempo y analizando la variación de humedad por método gravimétrico.

Antes de iniciar los ensayos de campo, se aplicó el método gravimétrico para determinar el contenido de humedad inicial del grano. Esto se realizó mediante el secado de cuatro muestras a 105 °C por 24 horas, aplicando las siguientes fórmulas para obtener los valores de la masa seca y el contenido de humedad inicial.

$$\%MS = \frac{\text{peso seco} - \text{peso crisol}}{\text{Peso húmedo}} \quad [1]$$

% MS = Porcentaje materia seca

$$\%H = 100 - \%MS \quad [2]$$

%H = Porcentaje de humedad

Para el registro de pérdida de humedad se tomaron muestras entre 10-15 g de café de la cámara de secado a diferentes intervalos de tiempo para su posterior análisis en el laboratorio. Estas muestras se recogieron en bolsas plásticas individuales con cierre hermético, tres veces al día hasta que el grano alcanzó 12% de humedad.

Análisis estadístico. A los datos obtenidos se aplicó el análisis estadístico de Saphiro Wilk, para evaluar la normalidad de los datos de temperatura y un análisis de varianza ANDEVA, con el cual se avaluó la homogeneidad de las temperaturas en el interior de ambos secadores. Finalmente, se aplicó un análisis t-student para evaluar cuál de los dos modelos fue el más eficiente en términos de temperaturas alcanzadas en el interior de la cámara de secado, durante el tiempo de operación en vacío. Para el desarrollo del análisis estadístico se utilizó el programa Statistical Package for the Social Sciences versión 19 (SPSS).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño conceptual del secador híbrido fue utilizado para la construcción del modelo piloto a través del Centro Zamorano de Energía Renovable. El dispositivo cuenta con cámaras colectoras y quemadores de acero inoxidable para prevenir la corrosión provocada por la presencia de sulfuros en el biogás (Anexo 2).

Operación y desempeño de secadores. La evaluación del desempeño de los secadores se realizó al comparar los dispositivos operando sin producto en la torre de secado. Los datos de temperatura obtenidos de los sensores ubicados en las diferentes bandejas fueron depurados seleccionando para el secador solar las temperaturas registradas los tres días previos a realizar los ensayos de secado, 14, 15 y 16 de agosto del 2016 (Cuadro 1).

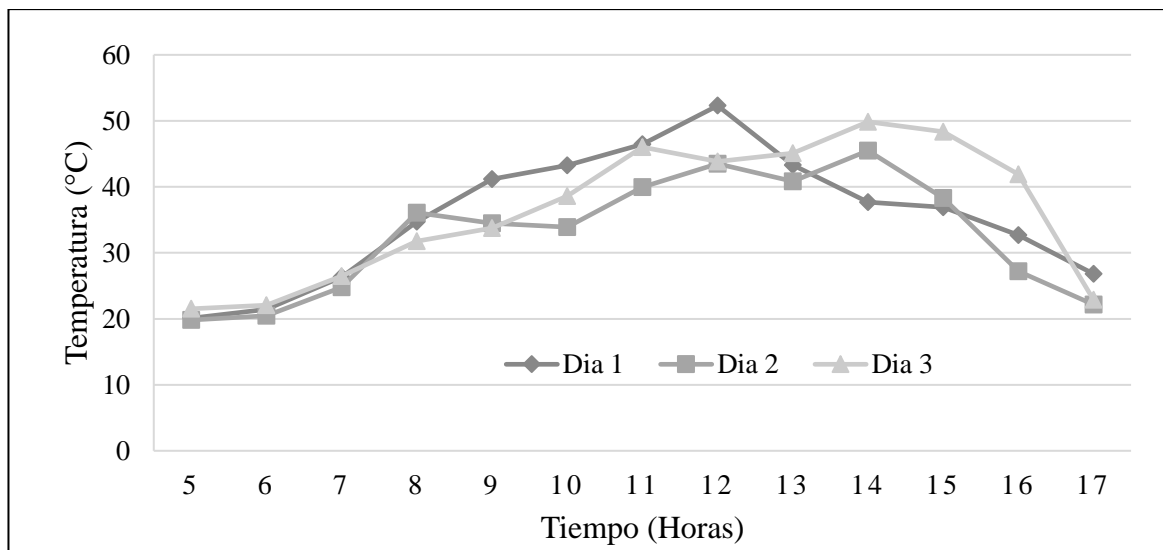


Figura 6. Comportamiento de la temperatura registrada en el secador solar, a diferentes horas. Operando en vacío.

Para evaluar la normalidad de los datos se aplicó una prueba de Shapiro Wilk, obteniendo un valor $P > 0.05$ e indicando que los datos provienen de una distribución normal. Se realizó una prueba ANDEVA con un intervalo de confianza del 95% para evaluar la homogeneidad de las temperaturas en la cámara de secado del secador solar, el cual resultó en $p = 0.84$. Esto significa que las temperaturas entre las bandejas no varían y por ende se consideran homogéneas (Figura 6).

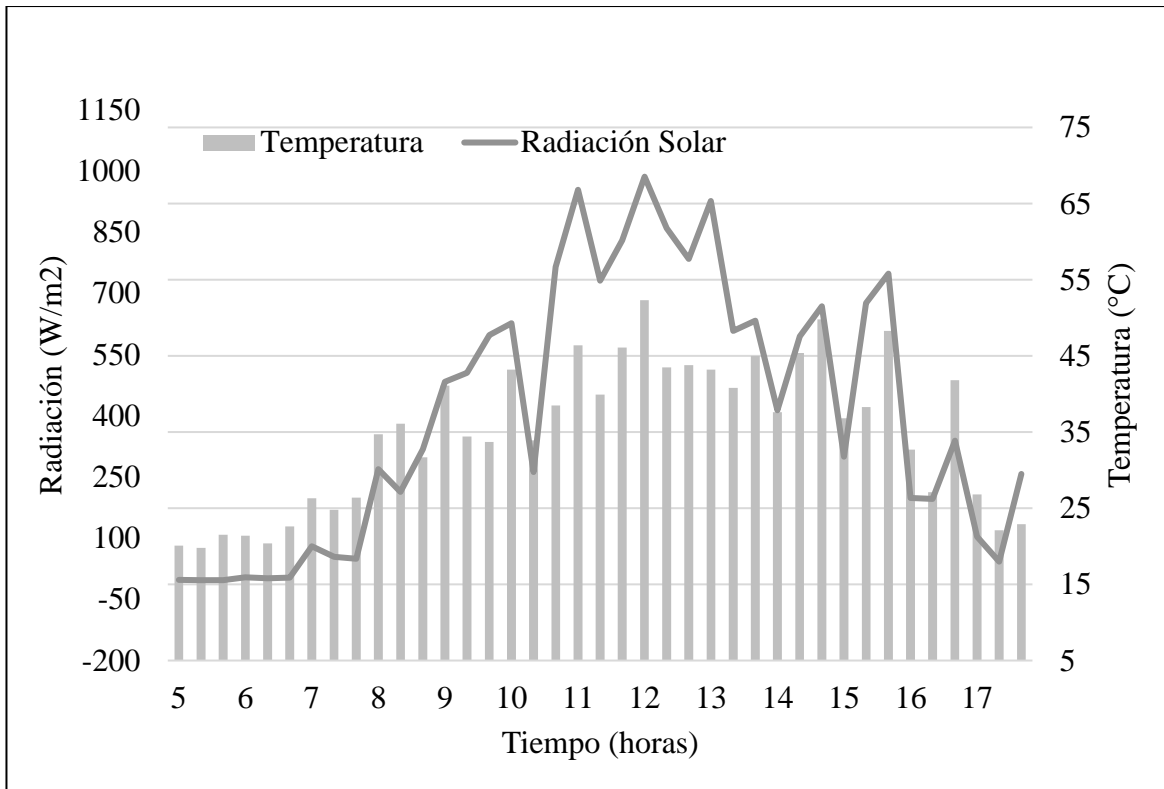


Figura 7. Temperatura en secador solar y radiación solar durante los días 14, 15 y 16 de agosto del 2016. Días previos a la realización de las pruebas de secado.

Para estimar la influencia de la radiación incidente sobre el desempeño del secador solar, se graficó esta variable y la temperatura promedio en la cámara de secado a las diferentes horas de operación. Los datos de radiación solar fueron obtenidos de los registros diarios del piranómetro ubicado en el parque solar de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Los resultados muestran que la temperatura es una variable directamente relacionada con la radiación solar, por lo que el desempeño de estos dispositivos será dependiente de la disponibilidad de radiación en el sitio de estudio (Figura 7).

Asimismo, se evaluó la homogeneidad de la temperatura en el interior de la cámara de secado del modelo híbrido, a través de los datos obtenidos de los 5 sensores i buttons dattalogers, descargados con el programa OneWireViewerX64. Los datos corresponden a los días 26, 27 y 28 de septiembre, previo a llevar a cabo los ensayos de secado aplicando la prueba estadística ANDEVA de una vía.

Cuadro 1. Temperaturas (°C) en el secador híbrido respecto a horas funcionando con biogás, durante los días 26, 27 y 28 de septiembre del año 2016.

Hora	Réplica	Bandejas				
		1	2	3	4	5
3:00 p. m.	1	46.0	54.0	43.0	54.5	47.5
	2	42.0	53.8	42.7	54.4	47.3
	3	48.9	70.6	51.4	75.0	57.4
4:00 p. m.	1	56.2	60.0	61.0	66.0	71.0
	2	56.4	61.1	60.2	66.4	71.0
	3	57.2	76.7	55.4	77.0	68.0
5:00 p. m.	1	47.0	50.0	41.0	52.0	51.0
	2	46.5	49.3	39.8	46.0	45.6
	3	43.4	47.8	41.6	42.7	42.5

Aplicando el análisis de Shaphiro Wilk, se demostró que los datos se comportaban normalmente, con un valor $p > 0.05$ (Anexo 6). Por lo tanto, para la evaluación de la homogeneidad en las temperaturas en la cámara de secado, se aplicó un ANDEVA con un intervalo de confianza del 95%, resultando en un valor $p = 0.074$ demostrando que los datos de temperatura entre las diferentes bandejas eran homogéneas (Figura 8).

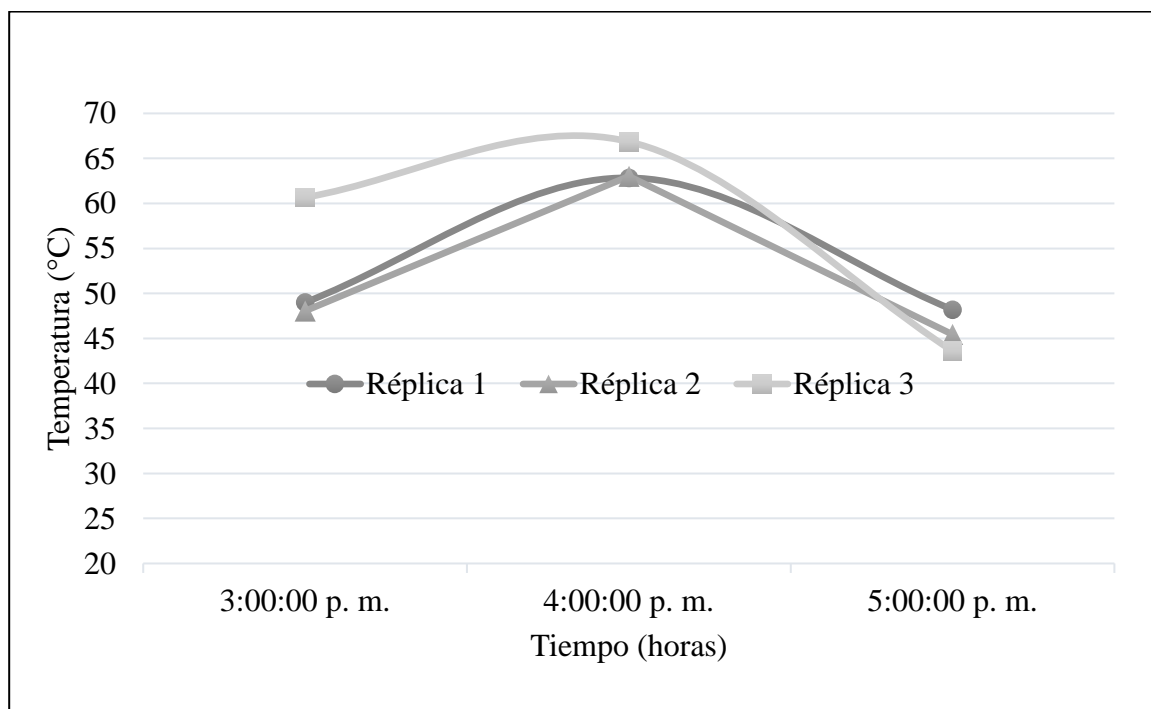


Figura 8. Comportamiento de la temperatura, registrada en el secador híbrido, a diferentes horas. Operado en vacío.

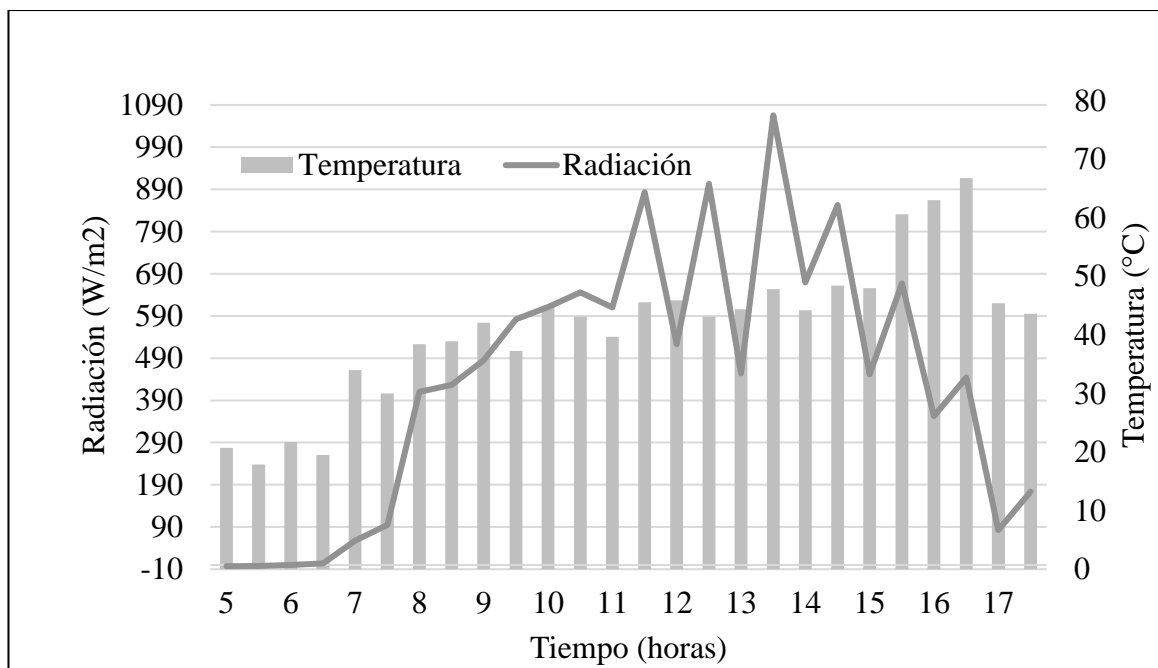


Figura 9. Influencia de la radiación solar sobre la temperatura de la cámara de secado en el modelo híbrido. Operando en vacío.

Remoción de humedad en granos de café. El porcentaje de humedad inicial en el grano de café pergamino, evaluado a través de un método gravimétrico en laboratorio, fue de 56.7% (Cuadro 2). Este resultado es congruente con estudios que muestran que el café pergamino después de salir de las pilas de lavado, cuenta con aproximadamente un 55% de humedad (Cruz, López de León, Pascual y Battaglia , 2010).

Cuadro 2. Evaluación del contenido de humedad inicial en el grano de café pergamino, mediante método gravimétrico.

C.C	Peso Crisol	Peso Inicial	Peso Final	P. %MS	P. % Humedad
17-K	42.4667	13.093	48.3	45.1	54.8
B5	50.0361	12.1444	55.5	45.3	54.6
G1	36.0774	12.3624	40.9	39.3	60.6
H3	35.7705	10.982	40.7	45.5	54.4
		TOTAL			56.7

C.C= Código de Crisol; P. = Promedio

El proceso de secado en el grano de café pergamino, se basa en la reducción del contenido de humedad de un 50-55 % hasta un 10 – 12%. El secador solar logró la reducción de humedad en el grano de café en diferentes lapsos de tiempo para las tres réplicas del ensayo

realizadas, esto debido a la variabilidad en las condiciones climáticas. El tiempo registrado para el secado fue de 58, 34 y 49 horas para los ensayos 1,2 y 3 (Figura 10).

Los ensayos de secado en los secadores seleccionados se realizaron en diferentes temporadas entre los meses de septiembre y octubre, existiendo un mes de diferencia entre los ensayos realizados con el modelo solar y el híbrido. Para determinar si existió diferencia significativa entre las condiciones ambientales verificadas durante los ensayos en ambos secadores, particularmente en la cantidad de energía solar disponible durante las pruebas de secado, se aplicó una prueba t-student a los promedios diarios de radiación solar obtenidos del piranómetro ubicado en el parque solar de Zamorano. La prueba estadística de t-student se realizó mediante el programa Excel, con un valor $p=0.125$, lo cual demuestra que no hay diferencia significativa entre la radiación disponible durante las fechas en que se desarrollaron los seis ensayos.

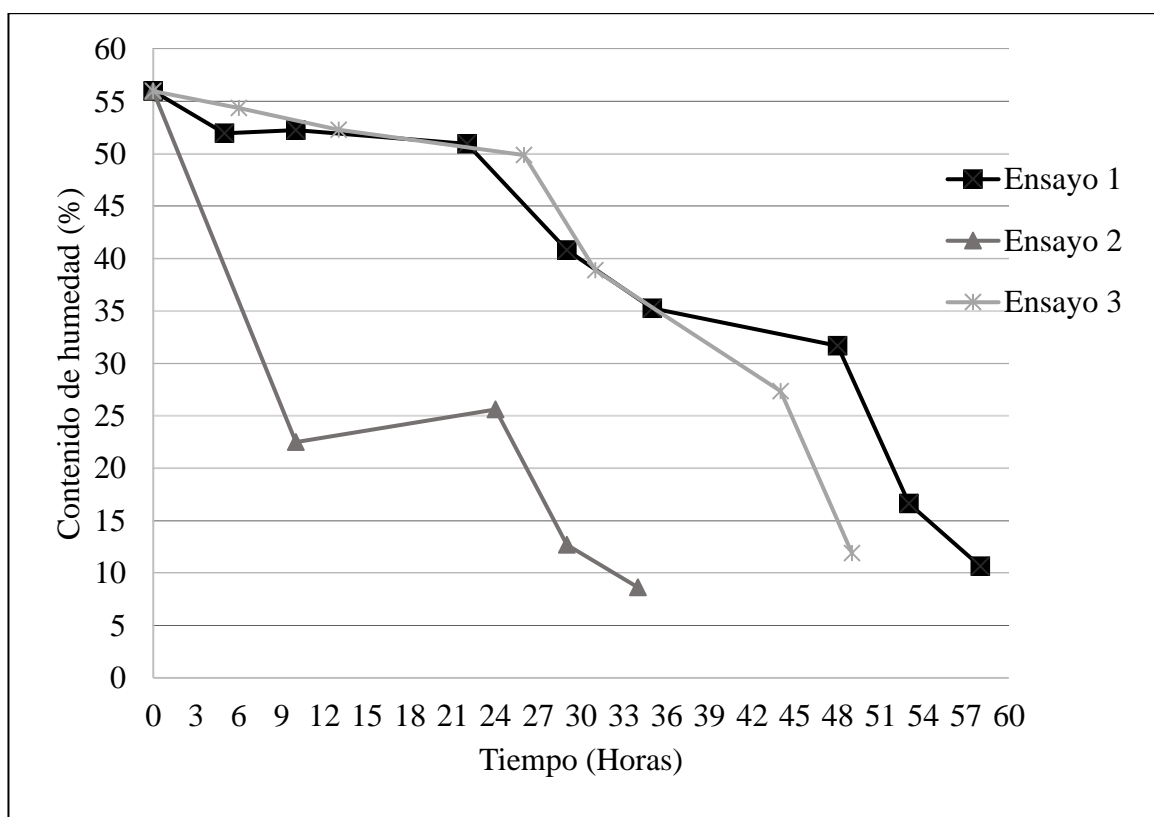


Figura 10. Disminución del contenido de humedad en el grano de café pergamino, mediante tres ensayos en campo, durante los meses de agosto y septiembre utilizando el Secador Solar de MIC-CC.

El tiempo de secado en el ensayo 2 fue menor mostrando variación en comparación con el ensayo 1 y 3, debido a que en los días en los que se realizó este ensayo se observó una radiación solar promedio hasta de 503 W/m^2 , a comparación con radiaciones solares promedios de 361 W/m^2 para el ensayo 1 y 345 W/m^2 para el ensayo 3.

Los ensayos de secado desarrollados en el modelo híbrido requirieron de un período inferior en comparación al secador solar para alcanzar el mismo rango de humedad final. Esto debido a que el secador híbrido combina la energía del colector solar en horas con alta irradiación y en horas de baja radiación solar mantiene las condiciones propicias utilizando los quemadores de biogás.

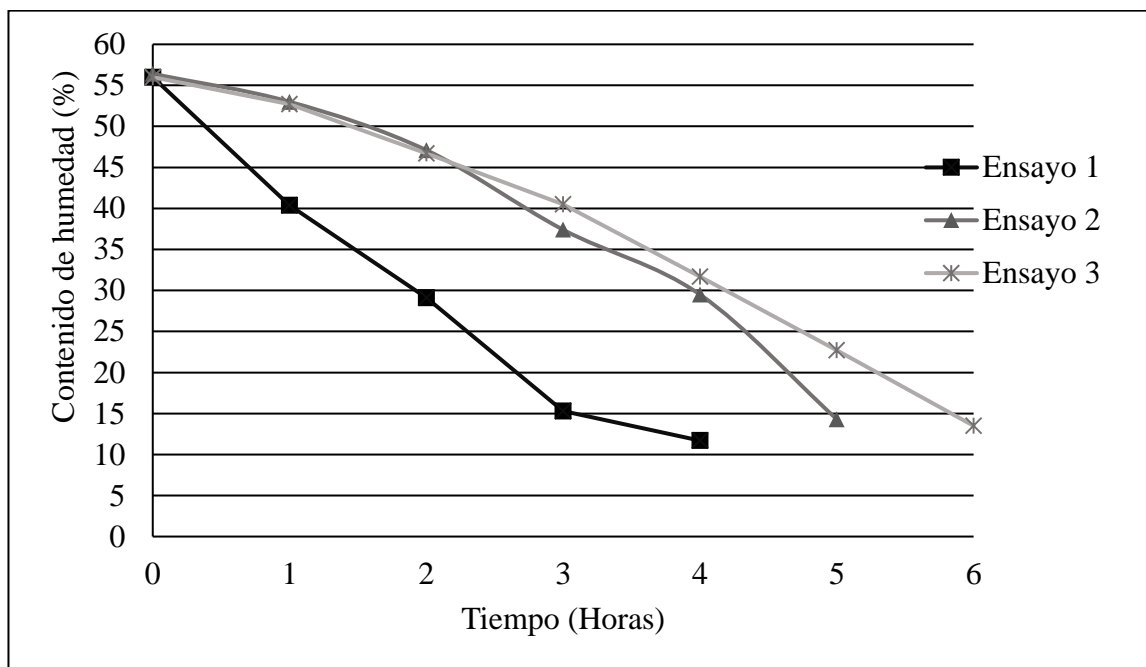


Figura 11. Disminución del contenido de humedad en el grano de café pergamino, mediante tres ensayos en campo, durante los meses de septiembre y octubre utilizando el secador híbrido del Módulo de Ganado Porcino.

En el ensayo 1, el grano alcanzó el 11.7% de humedad en 4 horas, operando el secador con energía solar de 12:00 pm – 2:00 pm y con biogás de 2:00 pm – 4:00 pm. El ensayo 2, se desarrolló entre las 1:00 pm – 3:30 pm con energía solar y entre las 3:30 pm – 6:00 pm con biogás, secando el producto en 5 horas, con un contenido de humedad final de 14.3%. Finalmente para el ensayo 3, el secado se llevó a cabo entre las 5:30 am y 8:00 am funcionando con biogás y con energía solar, entre las 8:00 am y 11:30 pm, secando el producto en 6 horas, con un contenido de humedad final de 13% (Figura 11).

El desempeño de secado en el café no varió de manera significativa en los ensayos 2 y 3, ya que las condiciones de temperaturas y extracción de aire se mantuvieron constantes. A diferencia del ensayo 1, donde no se mantuvo encendido el extractor, generando una recirculación de aire caliente en la cámara de secado, y un incremento de la temperatura a valores de hasta 80 °C, que redujo el tiempo requerido en la remoción de humedad en del grano, lo cual no es recomendable en términos de la calidad organoléptica del producto final.

Eficiencia en remoción de humedad. La eficiencia entre ambos secadores, se basó en la comparación de los perfiles de temperatura alcanzados en ambos modelos y la velocidad de remoción del contenido de humedad del grano de café. Las temperaturas promedio alcanzadas por el secador solar, fueron de 41 °C respecto a horas con sol. Sin embargo para el secador híbrido la temperatura promedio alcanzada fue de 66 °C, específicamente cuando este funcionaba con biogás en horas sin radiación solar. Dado el funcionamiento continuo del secador híbrido, se mantuvo una temperatura constante y mayor capacidad de secado.

En el secador solar la velocidad de remoción de humedad se mostró dependiente de la variabilidad climática, ya que la temperatura para secado es dependiente de la radiación solar, lográndose una velocidad de remoción promedio para los tres ensayos de 11mg humedad/g café-h. En el secador híbrido las condiciones de secado se mantuvieron constantes, mostrando una velocidad de remoción de humedad promedio para los tres ensayos de 100mg humedad/g café-h.

Para comprobar la eficiencia del secador híbrido en relación al secador solar se llevó a cabo un análisis estadístico de t-student, con un gráfico de caja, comparando las variaciones entre las medias de temperaturas de ambos secadores. La hipótesis nula asume que las medias son iguales, mostrando un valor $p = 0.000$. Por lo tanto, si hay diferencia significativa entre las temperaturas alcanzadas en los secadores logrando mayor velocidad de remoción en el híbrido donde se alcanzaron mayores temperaturas dentro de la cámara de secado Figura 12. Los tiempos de secado se lograron entre las 58, 49 y 34 horas en el secador solar y entre las 4, 5 y 6 horas en el secador híbrido. El secador híbrido mostró una mayor eficiencia en relación a la velocidad de remoción de humedad del café pergamino, con respecto a la velocidad de remoción de humedad en el secador solar.

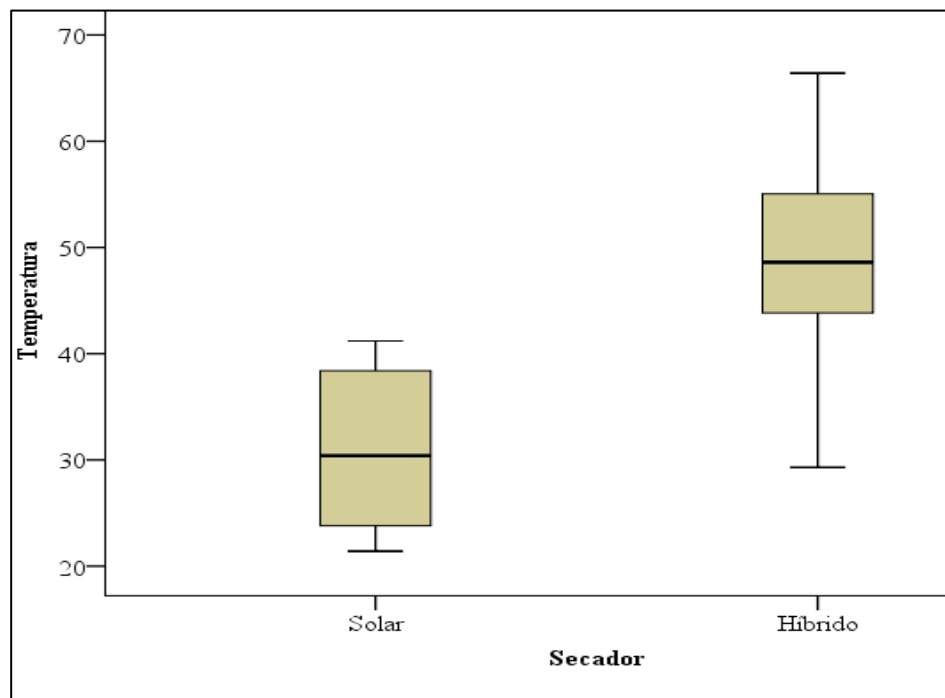


Figura 12. Gráfico de caja de las temperaturas promedio de ambos secadores.

4. CONCLUSIONES

- El prototipo del secador híbrido desarrollado representa una alternativa eficiente de integración del recurso de biogás en procesos productivos. Este presentó un desempeño favorable, reduciendo los tiempos de secado hasta en un 90% en el secado del grano de café y compensando las variaciones en disponibilidad de radiación solar.
- En relación al desempeño individual de los secadores, tanto el secador solar como el híbrido mantuvieron rangos de temperatura homogéneos en la cámara de secado, logrando curvas de temperatura con un comportamiento constante. El modelo híbrido mostró diferencias significativas, alcanzando mayores temperaturas e incrementando la velocidad de remoción de humedad en el grano de café.
- La combinación de convección forzada y mayores temperaturas son variaciones del diseño híbrido que contribuyen al incremento en la velocidad de remoción de humedad del grano de café pergamino.

5. RECOMENDACIONES

- Por tratarse de un prototipo con tecnología híbrida operada con biogás, se recomienda hacer mejoras en su diseño, particularmente en los dispositivos de regulación de temperatura, velocidad de extracción de aire y en la distribución de llamas en los quemadores de biogás.
- Para próximos estudios, se recomienda aumentar la escala del secador para el tratamiento de mayor volumen de producto.
- Determinar el impacto en la calidad organoléptica de los productos al emplear el proceso de secado en el modelo híbrido, aportando información más precisa sobre el comportamiento del secador híbrido.
- Aumentar el número de ensayos en el secador híbrido, variando la apertura de las válvulas de biogás y las horas en que se empleen los ensayos. Se recomienda que se empleen en las horas de la tarde donde no existe mayor incidencia de radiación solar.

6. LITERATURA CITADA

- Amer, B. M., Hossain, M. A. y Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, 51, 813-820.
- Berrueta-Soriano, V. M., Limón-Aguirre, F., Fernández-Zayas, J. L. y Soto-Pinto, M. L. (2003). Peasants' participation in the design and construction. *Agrociencia*, 37, 95-106.
- Cruz, D., López de León, E., Pascual, L. F. y Battaglia, M. (2010). Guía técnica de construcción y funcionamiento de secadoras tipo domo. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 104, 125-138.
- Daniel, A. M. (2007). *Diseño y construcción de un secador solar*. (Tesis de pregrado) Instituto Politecnico Nacional, Ingeniería en alimentos, Mexico.
- Encalada, H. J. (2015). *Efectos de deshidratación por osmoconvección en las características físicoquímicas y sensoriales de mango (Mangifera indica Var. Kent)*. (Tesis de pregrado). EAP, Zamorano, 25. Recuperado el 16 de junio de 2016, en <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4566/1/AGI-2015-019.pdf>
- Hernández, L. A. (1996). Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter. *Agronomía Colombiana*, 13, 76-90.
- Instituto Hondureño del Café, (2011). Desarrollo competitivo de la cadena de valor del café en postcosecha y comercialización interna en Honduras. Tegucigalpa, Honduras: Instituto Hondureño de Café. Recuperado de <http://repiica.iica.int/docs/B3124e/B3124e.pdf>
- López, E. M. (2006). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista ingeniería e investigación*, 26, 25-29.
- Mekhilef, S., Saidur, R. y Safari, A. (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1777-1790.
- Montero, I. (2005). Modelo y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos (Tesis Doctoral). Universidad de Extremadura, Badajoz, España.

- Montero, I., Blanco, J., Miranda, T., Rojas, S. y Celma, A. R. (2010). Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products. *Energy Conversion and Management*, 51, 1510-1521.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura . (2011). *Manual de biogás*. Roma, Italia.
- Organización Internacional del café, (2014). *Producción mundial de café*. London, England. Recuperado de <http://www.ico.org/>
- Pineda, C. R., Fernandez, C. y Oseguera, F. A. (s.f). *Beneficiado y calidad del café*. Instituto hondureño del Café.
- Prasad, J. y Vijay, V. K. (2005). Experimental studies on drying of Zingiber officinale, Curcuma longa l. and Tinispora cordifolia in solar-biomass hybrid drier. *Renewable Energy*, 30, 2097-2109.
- Taveira, J., Borém, F., Da Rosa, S., Oliveira, P., Giomo, G., Isquierdo, E. y Fortunato, V. (2015). Post-harvest effects on beverage quality and physiological performance of coffee beans. *African Journal of Agricultural Research*, 1457-1466. doi: 10.5897/AJAR2014.9263
- Temis, A. L., López, A. V. y Sosa, M. E. (2011). Producción de cafe (*Coffea arabica l.*): cultivo, beneficio, plagas, y enfermedades. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 5-2, 54-74.
- Vega, M. C. y Castro, Y. P. (2012). *Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la Digestión anaerobia del mucílago de café utilizando lodo estiercol del cerdo como inóculo*. Tesis de pregrado, Universidad industrial de santander , Ingenierías Físico-químicas, Bucaramanga. Recuperado el 23 de noviembre de 2015, en <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6913/2/145234.pdf>

7. ANEXOS

Anexo 1. Temperaturas de las bandejas en el secador solar MIC-CC

Hora	Replicas (días)	Temperatura en bandejas °C					Promedio ± Desv. Estándar
		1	2	3	4	5	
5:00 a. m.	1	19.7	20.1	20.9	19.9	19.9	20.1 ± 0.4
	2	19.5	19.9	19.9	19.9	19.9	19.8 ± 0.1
	3	21.5	21.7	21.4	21.5	21.5	21.5 ± 0.1
6:00 a. m.	1	20.9	20.8	23.9	20.8	20.8	21.4 ± 1.3
	2	20.2	20.6	20.4	20.6	20.5	20.4 ± 0.1
	3	22	22.3	22	22	22	22.6 ± 0.1
7:00 a. m.	1	26.14	24.3	31.8	24.7	24.7	26.3 ± 3.1
	2	26.4	23.9	25.7	24	24	24.8 ± 1.1
	3	27.6	25	28	25.9	25.9	26.4 ± 1.2
8:00 a. m.	1	37.6	32.4	37.6	33	33	34.7 ± 2.6
	2	40.4	33.2	40.4	33.5	33	36.1 ± 3.9
	3	33.3	29.5	34.8	30.6	30.6	31.7 ± 2.2
9:00 a. m.	1	45.2	38.3	44.9	38.7	38.7	41.1 ± 1.0
	2	33.9	34.1	36	34.4	34	34.4 ± 0.8
	3	35.4	31	38.3	32	32	33.7 ± 3.0
10:00 a. m.	1	46.1	40.2	48.7	40.6	40.6	43.2 ± 3.9
	2	35.1	31.9	37	32.8	32.8	33.9 ± 2.1
	3	40.9	34.8	44	36.6	36.6	38.5 ± 3.7
11:00 a. m.	1	46.9	44.3	49.2	46	46	46.4 ± 1.7
	2	40.6	37.7	43.6	39	39	39.9 ± 2.2
	3	46.6	42.7	49.7	45.6	45.6	46.1 ± 2.5
12:00 p. m.	1	50.1	53.1	46.5	55.9	55.9	52.3 ± 4.0
	2	42.1	42	44.4	44.5	44.5	43.5 ± 1.3
	3	41.6	42.9	45	44.9	44.9	43.8 ± 1.5
1:00 p. m.	1	41.6	45.5	39.3	45	45	43.2 ± 2.7
	2	37.8	41.7	40.7	42	42	40.8 ± 1.7
	3	42.1	44.5	45	46.9	46.9	45.0 ± 1.9
2:00 p. m.	1	35.8	37.5	38.5	38.3	38.3	37.6 ± 1.1
	2	42.8	46.6	42.6	47.7	47.7	45.4 ± 2.5
	3	43.2	51.5	48	53.6	53	49.8 ± 4.3

Hora	Replicas (días)	Temperatura en bandejas °C					Promedio ± Desv. Estándar
		1	2	3	4	5	
3:00 p. m.	1	32.7	36.6	45.5	34.8	34.8	36.8 ± 5.0
	2	36.1	40.3	37.7	38.7	38.7	38.3 ± 1.5
	3	42.1	51.3	45	51.7	51.7	48.3 ± 4.5
4:00 p. m.	1	28.5	30.8	42.6	30.8	30.8	32.7 ± 5.6
	2	25.1	28.2	27	27.8	27.8	27.1 ± 1.2
	3	35.1	45.1	40	44.6	44.6	41.8 ± 4.3
5:00 p. m.	1	24.4	25.7	32.5	25.7	25.7	26.8 ± 3.2
	2	21.9	22.3	22	22.3	22.3	22.1 ± 0.1
	3	21.9	23.1	23	23.5	23	22.9 ± 0.5

Anexo 2. Secador híbrido operado con energía solar y biogás



Anexo 3. Conexión del sistema de pilotos para la quema de biogás.



Anexo 4. Prueba de normalidad en las temperaturas del secador solar mediante el programa estadístico SPSS.

T °C Sensor	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
1	.880	13	.070
2	.901	13	.138
3	.875	13	.062
4	.908	13	.173
5	.908	13	.172

Anexo 5. Análisis estadístico ANDEVA en temperaturas del secador solar.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	137.702	4	34.426	.350	.844
Intra-grupos	18693.197	190	98.385		
Total	18830.899	194			

Anexo 6. Prueba de normalidad en las temperaturas del secador híbrido mediante el programa estadístico SPSS.

T °C Sensores	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
1	.871	9	.126
2	.893	9	.212
3	.837	9	.053
4	.932	9	.501
5	.854	9	.081

Anexo 7. Análisis estadístico ANDEVA en temperaturas del secador híbrido.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	0911.486	4	227.871	2.319	.074
Intra-grupos	3930.893	40	98.272		
Total	4842.379	44			

Anexo 8. Prueba de muestras independientes en los datos de radiación solar en el secador solar y el secador híbrido, durante los ensayos de secado en granos de café pergamino.

	Radiación	Secador Solar	Secador Híbrido
Mean		391.035577	516.8785
Variance		15491.5324	244.4115
Observations			8
Pooled Variance			12103.2833
Df			9
t Stat			-1.6896095
P(T<=t) one-tail			0.06268317
t Critical one-tail			1.83311293
P(T<=t) two-tail			0.12536634
t Critical two-tail			2.26215716