



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES

ESCUELA DE POSGRADO

**TESIS DE DOCTOR CON MENCIÓN EN
CIENCIAS AMBIENTALES**

**USO DE LA ENERGÍA SOLAR Y BIOENERGÍA PARA EL
SECADO DE EXCEDENTES AGROFORESTALES EN LA
REGIÓN TUMBES.**

AUTOR

Mg. EDWIN ALBERTO UBILLUS AGURTO

TUMBES, PERU

2013

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo EDWIN UBILLUS AGURTO, declaro que los resultados reportados en esta tesis, son producto de mi trabajo con el apoyo permitido de terceros en cuanto a su concepción y análisis. Asimismo declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de citas y con propósitos exclusivos de ilustración o comparación. En este sentido, afirmo que cualquier información presentada sin citar a un tercero es de mi propia autoría. Declaro, finalmente, que la redacción de esta tesis es producto de mi propio trabajo con la dirección y apoyo de mis asesores de tesis y mi jurado calificador, en cuanto a la concepción y al estilo de la presentación o a la expresión escrita.

EDWIN UBILLUS AGURTO

ACTA DE REVISION Y DEFENSA DE LA TESIS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES
 ESCUELA DE POSGRADO
 UNIDAD DE INVESTIGACION

"AÑO DE LA INVERSION PARA EL DESARROLLO RURAL Y SEGURIDAD ALIMENTARIA"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

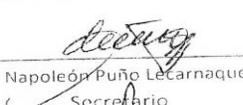
En Tumbes, a los veinte días del mes de diciembre del año dos mil trece, a las 9⁰⁰ horas, en Sala de Reuniones de la EPG, se reunieron los miembros del Jurado conformado por: Dr. Adan Alvarado Bernuy - Presidente; Dr. Napoleón Puño Lecarnaque Secretario, Dr. Martin Taboada Neira, Dr. Francisco Alburqueque Viera y Dr. Leocadio Malca Acuña - Miembros; para escuchar, deliberar y calificar la exposición y sustentación de la tesis titulada "USO DE LA ENERGÍA SOLAR Y BIOENERGÍA PARA EL SECADO DE EXCEDENTES AGROFORESTALES EN LA REGIÓN DE TUMBES"; presentado por el egresado (a) del Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales EDWIN ALBERTO UBILLUS AGURTO y asesorado por el Dr. AUBERTO HIDALGO MOGOLLON.

Concluida la exposición y sustentación, absueltas las preguntas y efectuadas las observaciones, lo (a) declaran: APROBADO por MAJORIA con calificativo de Muy Bueno cumpliendo con el requisito de acuerdo al Reglamento de Otorgamiento de Doctorado en la Universidad Nacional de Tumbes.

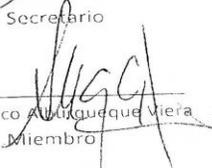
Siendo las 10⁰⁰ horas, se dio por concluido el acto académico, y dando conformidad se procedió a firmar la presente acta en presencia del público.

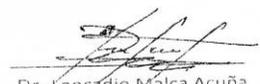
Tumbes, 20 de diciembre de 2013.


 Dr. Adan Alvarado Bernuy
 Presidente


 Dr. Napoleón Puño Lecarnaque
 Secretario


 Dr. Martin Taboada Neira
 Miembro


 Dr. Francisco Alburqueque Viera
 Miembro


 Dr. Leocadio Malca Acuña
 Miembro

C.c. Jurado de Proyecto de Tesis (5), Asesor(1), sustentante (1), UI (2)

RESPONSABLES

..... **MG. EDWIN UBILLUS AGURTO**
EJECUTOR

..... **DR. AUBERTO HIDALGO MOGOLLON**
ASESOR

JURADO DICTAMINADOR

..... **DR. ADAN ALVARADO BERNUY**
PRESIDENTE

..... **DR. NAPOLEON PUÑO LECARNAQUE**
SECRETARIO

..... **DR. FRANCISCO ALBURQUEQUE VIERA**
MIEMBRO

..... **DR. LEOCADIO MALCA ACUÑA**
MIEMBRO

..... **DR. MARTIN TABOADA NEYRA**
MIEMBRO

Uso de la energía solar y bioenergía para el secado de excedentes agroforestales en la región Tumbes

Edwin Ubillus Agurto

Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo el diseño y utilización de un secado solar de túnel que utilice bioenergía complementaria. El secador cuenta con dos partes, una corresponde al colector solar que se encuentra pintada de color negro en su superficie y tiene un área de 6 m² (2 m de ancho y 7 m de largo) para una capacidad de 400 kg de banano. El secador solar de túnel diseñado con materiales de bajo costo es eficiente para su uso en el secado de productos agroforestales como banano y algarroba, llegándose a aumentar la temperatura interna en el secador en un valor de hasta +26 °C comparado con la temperatura fuera del mismo y a la captación directa de energía solar de máximo 12.6 Kw de manera puntual. Sin embargo, la eficiencia disminuye obviamente en horas de menor radiación solar. No se llegó a demostrar el uso de la bioenergía como elemento complementario durante el secado solar de banano y algarroba. El banano logro ser deshidratado en el secador diseñado desde una humedad de 68.8 % (bh) o 0.2 kg de agua/kg de materia seca hasta 17.87 % o 0.1 kg de agua/kg de materia seca en un periodo de tiempo de 10 horas; mientras que para el caso de la algarroba se logró reducir la humedad de 18.94 % (bh) o 0.2 kg de agua/kg de materia seca hasta 4.5 % (bh) o 0.05 kg de agua/kg de materia seca en un periodo de tiempo de 5 horas.

Palabras clave: secador solar de túnel, bioenergía, banano y algarrobo, región Tumbes.

Drying agroforestry products using solar energy and bioenergy in Tumbes

Region

Edwin Ubillus Agurto

Abstract

The main aim of this research was design a solar tunnel dryer with and bioenergy as a complementary energy. The solar tunnel dryer designed had two parts; the collector (6 m² area) and a 400 kg capacity drying area 14 m². Local and cheap materials were used to build the dryer and it was efficient to dry banana and algarroba under the Tumbes weather conditions. The temperature tested inside the drying area was 12.6 KW. It was not possible to demonstrate the use of bioenergy as a complementary energy. The samples of banana were dried from 68.8 % (bh) to 17.87 % (bh) or 0.1 kg/kg (bh) in a period of time of 10 hours; while, in the case of algarroba the moisture was reduced from 18.94 % (bh) or 0.2 kg/kg (bh) until 4.5 % (bh) or 0.05 kg/kg (bh) in a period of time of 5 hours.

Keywords: Solar tunnel dryer, bioenergy, banana, algarrobo, Tumbes region.

CONTENIDO

RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1. Introducción -----	9
1.1. Situación problemática -----	11
1.2. Formulación del problema -----	12
1.3. Justificación e importancia del problema -----	12
1.4. Hipótesis de trabajo -----	13
1.5.- Objetivos de la investigación -----	13
2. Marco de referencia del problema -----	13
2.1. Antecedentes -----	14
2.2. Bases teóricas-científicas -----	21
3. Material y métodos -----	29
3.1. Tipo de estudio -----	30
3.3. Población, Muestreo y Muestra -----	30
3.4. Materiales y método de investigación -----	30
3.4.1. Pruebas preliminares -----	30
3.4.2. Diseño del prototipo del secador -----	31
3.4.3. Medición de la eficiencia del secador -----	32
3.4.4. Diseño de los procesos de secado -----	32
4. Resultados y discusión -----	33
4.1. Pruebas preliminares -----	34
4.2. Diseño del prototipo del secador -----	38
4.3. Diseño del secador -----	45
4.4. Diseño de los procesos de secado -----	48
5. Conclusiones -----	51
6.- Recomendaciones -----	52
7. – Bibliografía -----	53
Anexos -----	

1.- Introducción

1.1. Situación problemática

Tumbes es una región predominantemente agrícola, siendo sus principales productos en orden de importancia el arroz y el banano, ambos con problemas particulares. En el caso del arroz uno de los principales problemas es la mala gestión de los residuos agrícolas, los cuales son quemados al aire libre sin control con el significativo impacto sobre la atmósfera y sobre la salud humana por la generación de gases (monóxido de carbono, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, entre otros) y material particulado, contribuyendo negativamente a fenómenos como el cambio climático global. Diferentes autores como Jenkins, Turn y Williams (1996), Tipayarom & Kim Oanh (2007), Cao *et al.*, 2008, Zhang *et al.*, (2008), Christian *et al.*, (2003), han determinado diferentes factores de emisión en g de gas generado/kg de paja de arroz seca quemada, reportando valores de entre 791 y 1757.6 para el CO₂, 25.2 y 179.9 para el CO, 1.81 y 3.52 para NO_x, 0.53 y 0.62 para SO₂ y entre 2.28 y 6.04 para material particulado.

En cuanto al banano, son muy visibles los inconvenientes que presenta el cultivo al ser un producto climatérico con una velocidad de respiración alta y una tasa de maduración rápida, lo que significa problemas para su manejo post-cosecha sobre todo por el tema del tiempo que se encontraría disponible para su transporte a los mercados de destino. Justamente una de las técnicas que permiten conservar sobre todo los excedentes de cosecha (que incluyen productos con un índice de madurez alto y otro producto descartado por motivos de manchas, calibre, entre otros) es el secado, el cual adicionalmente le incorporaría un valor agregado al producto. Janjai *et al.* (2009), afirman que la banana no es solo para procesos de preservación, sino también para modificaciones de sabor, aroma y textura y satisfacer las preferencia de los consumidores dar valor agregado a los productos.

Por otro lado, existen poblaciones rurales asentadas en los bosques secos, las cuales en su mayoría están dedicadas a la agricultura, una agricultura que solo les permite sobrevivir, con lo cual hacen un mal uso de los recursos del bosque en actividades insostenibles como la tala. A pesar de que se conoce la problemática que aqueja a estas poblaciones no se les ofrece alternativas técnica, económica y ambientalmente viables que permitan cambiar la tendencia actual y sobretodo elevar la calidad de vida de las mismas. Una de las alternativas de solución es el aprovechamiento de los productos forestales no maderables (PFNM) que incluyen la utilización de productos diferentes a la madera: hojas, frutos, flores, entre otras, para la obtención de productos que tienen gran aplicación en la industria de alimentos, cosmética y farmacéutica como aceites esenciales, principios activos, entre otros; los cuales utilizan con una etapa primaria en su obtención justamente el secado.

Es evidente que el tema del uso de energía es un hecho crítico dentro del diseño de nuevos procesos debido a las implicancias económicas y ambientales que de ello deriva. Por lo que actualmente se está requiriendo cada vez más del uso de energías renovables como la energía solar, eólica, geotérmica, de la biomasa, entre otras.

El secado al aire libre, donde los productos se exponen directamente al sol colocándolos sobre el suelo, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y es aun uno de los procesos agrícolas más utilizados en los países en desarrollo. Este procedimiento es de muy bajo costo pero puede producir fuertes mermas ocasionadas por las lluvias durante el proceso de secado por el ataque de insectos, roedores, pájaros sobre o subsecado y la aparición de aflatoxinas (Murthy *et al.*, 2009).

En las regiones industrializadas el bajo costo del combustible permitió por muchas décadas el desarrollo de procesos de secado artificial en gran escala basados en el uso de combustibles. En los últimos años, la escasez y mayores precios de los combustibles ha despertado un nuevo interés en el secado basado en el uso de energía solar tratando de desarrollar diversas técnica que permiten solucionar los problemas mencionados en relación al secado al aire libre.

La radiación solar en Tumbes es alta, llegando a valores de hasta 1100 W/m^2 de energía que se recibe en horas punta como son entre el medio día y la una de la tarde considerando que es una energía abundante, relativamente de bajo costo y sobretodo limpia desde el punto de vista ambiental (Laboratorio de análisis ambiental de la Escuela de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Tumbes, 2011).

Para resolver el problema de la intermitencia de la energía solar la solución podría ser la combinación con otras tecnologías renovables como por ejemplo al bioenergía ya sea mediante el uso de biogás o la generación directa de calor utilizando biomasa procedente de los residuos agrícolas y pecuarios.

Este sistema podría ser aplicable a la situación de las zonas rurales de la región Tumbes, dado que existe la energía solar suficiente, alcanzando niveles de 1200 W/m^2 de energía solar y a su vez existen excedentes agrícolas como el del banano, que muchas veces se deteriora en el campo, y a su vez la biomasa como paja de arroz, cascara de arroz o estiércol de animales para ser utilizada en la producción de bioenergía (Laboratorio de análisis Ambiental de la Escuela de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Tumbes, 2011).

1.2 Formulación del problema

¿Es posible aplicar el secado que alterne de forma eficiente la energía solar y bioenergía para productos agroforestales en la región Tumbes?

1.3 Justificación e importancia del problema

Los principales aportes de la presente investigación serían:

- a. La presentación de una alternativa que permitiría reducir el impacto ambiental de forma directa e indirecta producidas por el mal manejo de residuos vegetales. Permitiría reducir la cantidad de residuos agrícolas que se queman descontroladamente a campo abierto y que originan considerables cantidades de gases y partículas a la atmosfera

afectando negativamente la salud humana de forma directa y contribuyendo al cambio climático global.

- b. Establecimiento de una alternativa de aprovechamiento para materiales vegetales excedentes en la producción agrícola, permitiendo dar un valor agregado a productos agrícolas que en condiciones actuales se pierden o simplemente se venden a precios que no permiten cubrir los costos de producción de los mismos, permitiendo de forma directa un incremento en los ingresos de la población de las zonas rurales e indirectamente un aumento de su calidad de vida.
- c. Provee una alternativa sostenible de aprovechamiento de productos forestales no maderables para los bosques secos de Tumbes, ofreciendo una alternativa sostenible a la tala indiscriminada de los bosques. Ofrece una alternativa productiva sostenible para combatir la pobreza en zonas rurales de Tumbes.
- d. Plantea las cuestiones técnicas conducentes a la materialización de una alternativa productiva que puede ingresar en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y que tiene financiamiento de países desarrollados generadores de CO₂.

1.4 Hipótesis de trabajo.

La energía solar y bioenergía son tecnología utilizables de manera eficiente en el secado de productos agroforestales en la región Tumbes.

1.5.- objetivos de la investigación

1. Aprovechar la energía solar y bioenergía en el secado de productos agroforestales en la región Tumbes.
2. Medir la eficiencia del secador a utilizar.
3. Diseñar dos procesos de secado para productos agroforestales utilizando el secador.

2. Marco de referencia del problema

2.1. Antecedentes

En el mundo existen diferentes experiencias de aplicaciones del secado solar directo, indirecto o mixto, a continuación se menciona alguna de ellas:

Munir *et al.* (2013), desarrollaron una investigación para fabricar un secador solar de túnel para el secado de frutas, vegetales y plantas medicinales. El sistema fue diseñado como un sistema portátil para aplicaciones descentralizadas en varias locaciones para satisfacer los requerimientos de pequeños agricultores y cooperativas. La sección del secador fue trapezoidal teniendo un área de 0.254 m^2 con un ancho de 1 m y un largo de 3 m. Esta comprendido de un colector de 1.35 m de largo, una la sección de secado de 1.65 m de y dos ventiladores equipados con paneles fotovoltaicos para proveer el flujo de aire. Un plástico de polietileno transparente fue usado para cerrar la parte superior del secador, manteniendo constante el flujo de aire dentro del secador. El secado fue sencillo cuando el aire de secado se mantuvo entre $8 - 14 \text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la temperatura ambiental y la velocidad de aire estuvo entre 0 a 1 m/s. La eficiencia del secador solar fue de entre 40 a 50 %.

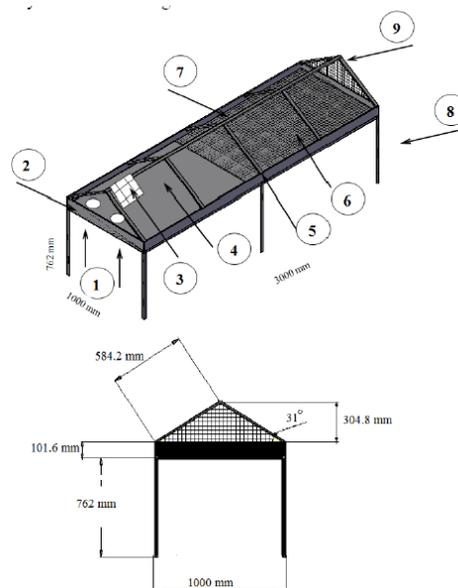


Figura 1. Diseño del secador de túnel portátil Munir *et al.* (2013)

Khadwilard & Chunkaew (2011), estudian la efectividad de un secador de aire calentado por una estufa de hoja para el secado de banana. El sistema considero una cámara de secado, un intercambiador de calor, una estufa de hoja y un sistema de control para el ajuste de la velocidad de aire principalmente. La capacidad de secado fue de 30 kg desde una humedad inicial de 250.10 % (bs) hasta una humedad final de 63 % (bs) utilizando un periodo de secado de 12 h.

Bond *et al.* (2011), plantean el diseño y construcción de secadores solares para madera para zonas tropicales encontrando que los hornos de secado solares son una alternativa económica a los hornos convencionales, especialmente para operaciones pequeñas y comunidades rurales. Hornos calentados con energía solar tiene gran potencial para países en desarrollo, especialmente en ubicaciones remotas con poco acceso a fuentes de energía convencionales.

Janjai *et al.*, (2011), desarrollaron y probaron un secador tipo invernadero de 1000 kg de capacidad. El secador tiene forma parabólica y está cubierto de planchas de policarbonato. La base del secador es de concreto negro con un are de 7.5 x 20 m. Se utilizaron 9 ventiladores abastecidos por tres módulos de celdas solares de 50 W para la ventilación. Este secador es rutinariamente utilizado para el secado de ajíes, banana y café. Para el análisis de la eficiencia del secador se midieron la temperatura, humedad relativa del aire y contenido de humedad del producto. 1000 kg de banana fueron secados desde una humedad inicial de 68 % (bh) durante un periodo de 5 dias, comparado con los 7 dias que requiere el secado solar al aire libre. El aji, café y banana colocados en el secador estuvieron completamente protegidos de insectos, animales y lluvia, por lo que productos de alta calidad fueron obtenidos. El periodo de retorno de la inversión fue estimado en 2.5 años y el costo del secador fue de US\$ 14980.

Chavan *et al.*, (2011), comparan el secado en un secador solar de túnel y el secado solar directo, mediante el secado de caballa. Se aplican diferentes modelos de secado de caballa en el secador solar de túnel. Se requirió 27 horas para el secado de la caballa en el secador de túnel y 48 horas para el secado por

secado solar directo, siendo las eficiencias de secado de 19.87 y 12 % respectivamente. El pescado secado entre 40 y 46°C por 20 a 30 horas alcanzo las mejores puntuaciones en el panel sensorial

Fudholi *et al.*, (2010), plantean que el secado solar de productos agrícolas y marinos tiene una aplicación atractiva por su bajo costo. Se han diseñado numerosos secadores solares y se han desarrollado en varias partes del mundo, variando el grado de eficiencia. Básicamente existen 4 tipos de secadores: los secadores solares directos, secadores solares indirectos, secadores de modo mixto y secadores solares híbridos. Este *paper* es una revisión de esos tipos de secadores solares con enfoque en los productos secados y los aspectos técnicos y económicos. Las direcciones técnicas en el desarrollo de sistemas de secado solar para productos agrícolas son diseño de colector solar compacto, alta eficiencia, almacenamiento integrado y largo tiempo de vida del sistema de secado. Colectores basados en calentamiento con aire no son los únicos viables, también existen secadores acoplados a intercambiadores de calor que utilizan agua y aire. El agua caliente se utiliza también como almacenamiento de calor para los sistemas de secado solar.

Amer *et al.*, (2010), diseñan y construyen un secador hibrido solar utilizando la energía solar directa y un intercambiador de calor. El secador consistió de un colector solar, un intercambiador de calor con almacenamiento de calor y la cámara de secado. El secador fue operado durante días soleados como secador solar, y durante los días nublados como secador solar hibrido. El secador también fue operado durante la noche utilizando la energía almacenada en agua la cual fue calentada durante el tiempo de radiación solar y utilizando calentadores eléctricos colocados en el tanque de agua. La eficiencia del secador solar fue aumentado por el reciclaje de alrededor de 65 % de aire seco en el secador solar y eliminado una pequeña cantidad de este fuera del secador. Bajo las condiciones del verano de Europa central la temperatura pudo aumentar de 30 a 40 °C encima de la temperatura ambiental. El secador solar fue probado para el secado de rodajas de banano. La capacidad del secador fue de 30 Kg de trozos de banano en 8 horas

en un día soleado desde una humedad inicial de 82 % hasta una humedad de 18 %. El color, aroma y textura de los productos secados fueron mejores que los secados al aire libre.

Havrland, Hutla & Adamovský (2010), diseñan y construyen un secador de biomasa usando como fuente de energía una combinación entre energía convencional y energía solar, con fines educativos y de investigación. Este secador integra un colector solar en el techo del mismo, de acuerdo a la figura 2.

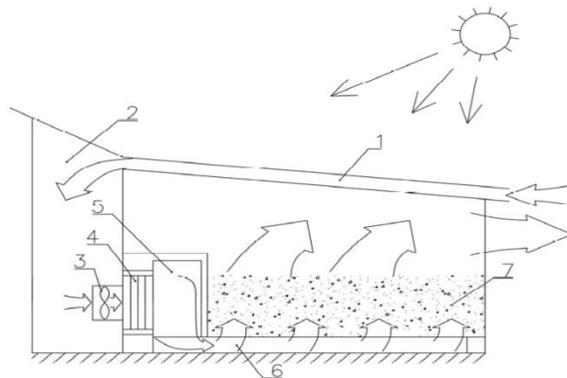


Figura 2. Esquema de secador solar de biomasa. (Havrland et. al., 2010)

Janjai *et al.* (2009), realizan un estudio experimental para evaluar la performance de un secador tipo invernadero para el secado de longan y banana en Tailandia. El secador consistió de un techo cubierto de planchas de policarbonato sobre un piso de concreto. 3 ventiladores alimentados por un panel fotovoltaico de 50 W constituyen el módulo de ventilación. El secado de banana fue de 4 días, mientras que por secado natural este se realiza entre 5 y 6 días bajo condiciones similares. La calidad de los productos secados, fue medida en términos de color y sabor, obteniéndose productos de alta calidad. El secador tiene una capacidad de 100 kg de banana y podría producir hasta 1260 Kg de banano deshidratado al año. El costo total del secador fue de \$US 4563.

Koua *et al.* (2009), investigan el comportamiento del secado en capa fina del banano, mango y tapioca en un secador solar directo. Los modelos mas utilizados para secado de capa fina: *Newton*, *Page*, *Page modifie*, *Hederson et Pabis*, *Wang et Singh*, *Logarithmique* y *Welibull*.

Murthy (2009), hace una revisión de varios aspectos del secado solar aplicado a productos alimenticios a pequeña escala. Los tipos de secadores más populares en la región Asia-Pacífico y nuevos tipos de secadores con tecnologías mejoradas son discutidos. Son presentadas algunas soluciones para el secado solar al aire libre. También son presentados aspectos a considerar para el modelamiento e investigaciones experimentales conducidas con varios alimentos.

Bala (2009), presenta desarrollo y potencial de la tecnología de secado solar para el secado de frutas, vegetales, especias, plantas medicinales y pescado. Esfuerzos previos sobre secado de los diversos productos son críticamente examinados. Son presentados recientes desarrollos como el secador solar de túnel, versión mejorada de secador, secador solar de techo integrado y secados solar tipo invernadero para frutas, vegetales, plantas medicinales y pescado, estudiando su eficiencia de secado, calidad de productos secos y los costos de los mismos para zonas rurales y subtropicales.

Kulanthaisami *et al.*, (2009), realizan un estudio en India para aplicar el secado solar en túnel de coco como alternativa para el reemplazo del secado del mismo material al aire libre, encontrando resultados satisfactorios con respecto a la reducción de humedad, de 55 a 6 %, alcanzando temperatura de 15 a 20 °C más que la temperatura ambiente. El secador consistió en un secador de túnel semicilíndrico cuya estructura estuvo cubierta con una capa de polietileno con estabilización de rayos ultravioleta. El área de secado fue de 18 x 3.75m, estando el fondo pintado de color negro para alcanzar mayor eficiencia en el secado. Manjula *et al.*, (2011), aplicaron también en India un secador solar de túnel para secar ajíes.

Hassanain (2009), utiliza un sistema de secador solar como el que se muestra en la figura 3, utilizado para secar pulpa de banano con muy buenos resultados.

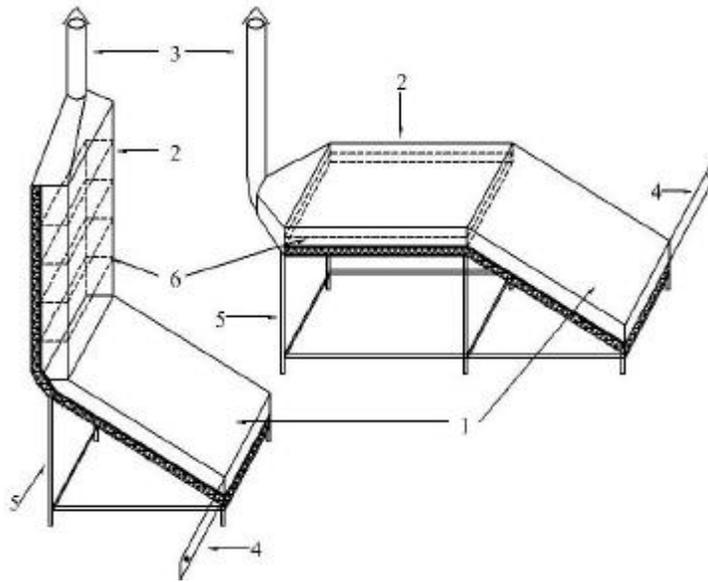


Figura 3. Sistemas de secadores solares usados en el estudio de Hassanain (2009). 1. Colector solar 2. cámara de secado 3. Chimenea solar 4. Tapa 5. Soporte

El mecanismo del sistema de secado es flexible y aplicable para diferentes productos agrícolas frescos. El secador está constituido de materiales baratos como Madera, plástico, vidrio y metal. Está compuesto de un colector solar, una cámara de secado y una chimenea solar y/o soplador. Sin embargo los tiempos de secado resultaron ser excesivos alcanzando periodos de hasta 48 h para llegar a humedades mayores a 20 % (bh), en la mayoría de los experimentos

Ofoefule & Uzodinma (2009), utilizan una mezcla de residuos vegetales y animales para producir biogás en un fermentador de 50 L, obteniendo un producto con buenas características de calidad. El material vegetal usado fue cascara de yuca y los residuos animales fueron heces de vaca principalmente en un ratio 1:1, logrando mejorar el rendimiento en biogás comparado con la fermentación del material vegetal solo.

Ghaba *et al.*, (2007), diseñan un secador solar directo. Este es construido de materiales locales como madera, vidrio y metal para el secado de mango, banana y yuca. Durante los experimentos se analizó el comportamiento del secador mediante estudio de cinética y el establecimiento de un balance de calor. Como resultados más saltantes se obtuvo que el contenido de humedad de las bananas

de 80% a 13% en un periodo de 22 h, permitiendo la conservación del producto durante 1 año sin adición de conservantes.

Costa y Ferreira (2007), diseñan un secador solar mixto para el secado de frutas tropicales en Brasil. Básicamente, en el esquema del aparato de secado hay un colector solar, una cámara de secado, un extractor eólico y un ventilador acoplado a un motor para promover la convección forzada del aire caliente, acorde a la figura 4.

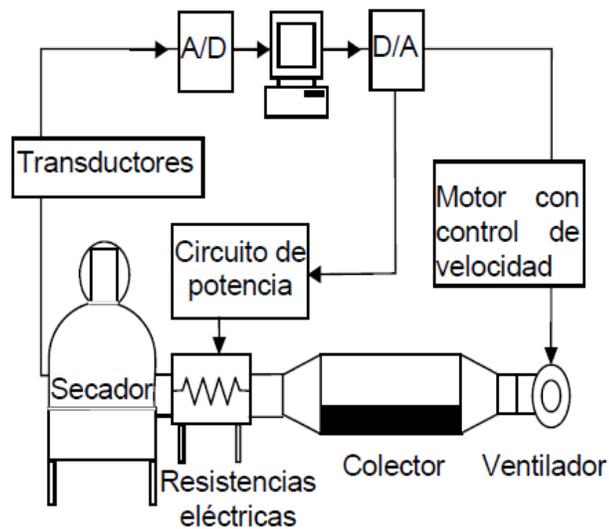


Figura 4. Sistema de secador solar-eléctrico Costa y Ferreira (2007)

Viglasky, Langova & Horbaj (2006), desarrollan una investigación encaminada a reducir el uso de combustibles convencionales mediante la utilización de un secador solar que incorpora un colector de aire con la finalidad de aprovechar más eficientemente la energía solar y lograr alcanzar las temperaturas de secado necesarias de entre 40 y 100 °C

Pontin *et al.* (2005), utilizan un secador solar indirecto para secar manzanas, logrando en estas una disminución de la humedad en las manzanas desde un 80% de humedad inicial en base húmeda hasta un 20% aproximadamente de humedad final, coincidiendo con las características del producto seco comercializado. Plantean que es posible utilizar para el secado de manzanas a escala artesanal este tipo de tecnología, sencilla, económica y de mínimo impacto

ambiental, pudiendo utilizarse aún cuando las condiciones climáticas no sean favorables.

Experiencias anteriores el uso de la bioenergía a partir de desechos agrícolas y forestales son diversas, a continuación alguna de ellas:

Ezekoye & Okeke (2006), reportan la producción de biogás usando una mezcla de granos usados y cascara de arroz. Diseñaron y construyeron un biodigestor de 300 galones. Una mezcla de 50/50 de los materiales fue utilizada, con un ratio de 1:3 entre residuos y agua. La digestión fue llevada a cabo en operación en batch. El volumen de biogás máximo obtenido fue de 150 L a los 47 días, sin embargo las primeras producciones fueron a los 20 días.

Saev, Koumanova & Simeonov (2009), investigaron la codigestión de residuos de tomates y heces de animales en un digestor semicontinuo y condiciones mesófilas. Lograron obtener una conversión de 72.5 % de sólidos orgánicos alimentados en el digestor en 20 días de tiempo de retención hidráulico. El rendimiento de gas promedio fue de 220 dm³/kg de material adicionado.

Adeyanju (2008), estudia el efecto de agregar cenizas producto de la quema de Madera con restos de heces de cerdo y cascara de yuca, a nivel de laboratorio, utilizando un digestor anaeróbico para la producción de biogás durante un periodo de 45 días.

Martina *et al.* (2005), realizan un ensayo completo de biodigestión anaeróbica para obtención de gas metano a partir de aserrín y viruta de pino con el fin principal de obtener una relación entre la cantidad de biogas producido y la cantidad de residuos de madera utilizados. Para ello se utilizó el biodigestor de carga única o batch construido en el Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE en el marco de un Proyecto sobre producción de biogas a partir de los desechos de madera de la zona, principalmente algarrobo, quebracho y pino. Se indican los porcentajes y volúmenes de carga, la relación entre agua, aserrín y volumen libre, volúmenes de gases producidos, tiempos de reacción, mediciones de pH y porcentajes de dióxido de carbono obtenidos. Los valores obtenidos servirán para tomarlos como referencia para dimensionar biodigestores mayores de carga continua para uso comunitario.

2.2. Bases teóricas Científicas.

2.2.1 La energía solar

La potencia solar que recibe el planeta Tierra (fuera de la atmósfera) es cerca de 173×10^{12} kW o una energía de 15×10^{17} kWh por año. Al atravesar la atmósfera, cerca de 53% de esta radiación es reflejada y absorbida por el nitrógeno, oxígeno, ozono, dióxido de carbono, vapor de agua, polvo y las nubes. Por lo tanto al pasar esta radiación por una distancia de 150 millones de km, se reduce esta cantidad y al final el planeta recibe energía promedio a 3×10^{17} kWh al año, equivalente a 4000 veces el consumo del mundo entero en un año (7×10^{13} kWh/año), lo cual nos indica la enorme potencia del Sol (Craig, Vaughan & Skinner, 2007), ver figura siguiente.

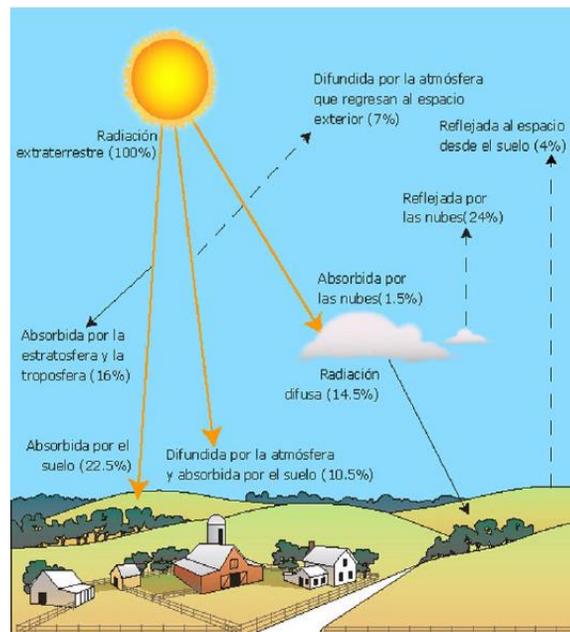
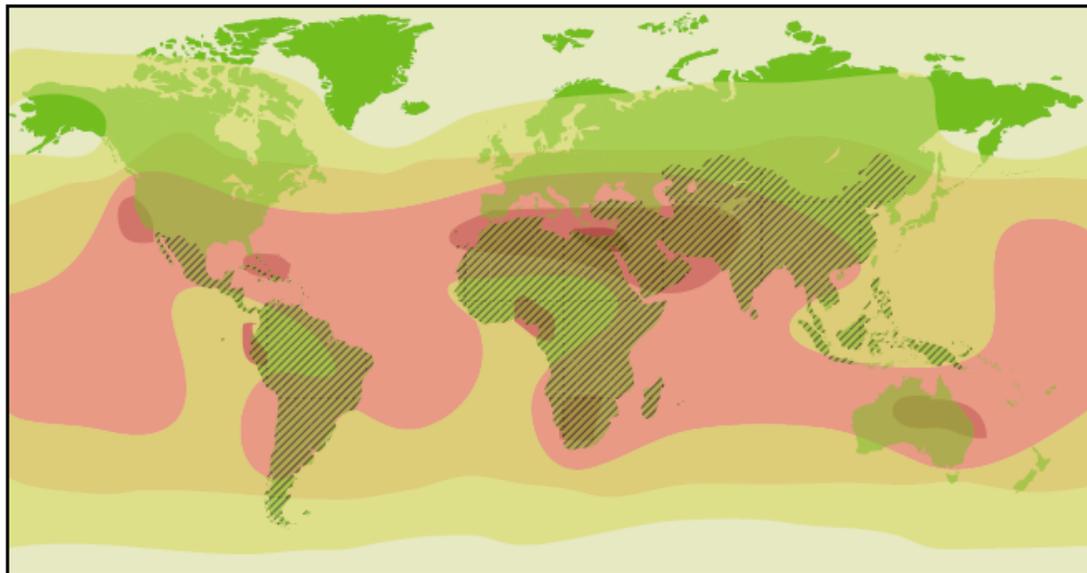


Figura 5. Balance de la energía solar al entrar a la tierra (Craig, Vaughan & Skinner, 2007)

En la figura contigua del anexos, se muestra un mapa mundial de la distribución de las radiaciones solares, estando la zona norte del Perú como una de las

regiones con mayor incidencia de radiación solar en el mundo en términos del promedio anual (W/m^2).



Promedio anual de radiación solar (Wattios/ m^2 en 24 horas)

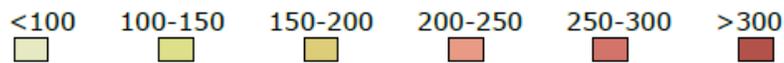


Figura 6. Mapa de estimación de la radiación solar en el mundo (Craig, Vaughan & Skinner, 2007)

Craig, Vaughan & Skinner (2007), afirman que el término energía solar generalmente se refiere a la conversión de los rayos solares, en energía, en formas tales que puedan satisfacer las necesidades humanas.

Esta energía puede entenderse mejor si se le divide en dos categorías: energía de baja entalpia, en la que la luz solar difusa se emplea para producir formas de energía de baja temperatura, y la energía de alta entalpia, que implica alguna forma de concentrador solar, o un proceso físico-químico que produce electricidad, o combustible químico, como el hidrógeno.

2.2.1.1 Aplicaciones tecnológicas

Trebejo (1998), afirma que la recepción directa de la energía solar requiere de dispositivos artificiales llamados colectores solares que son diseñados para

recoger energía, después de concentrar los rayos del Sol. La energía, una vez recogida, se emplea en procesos térmicos o fotovoltaicos. En los procesos térmicos, la energía solar se utiliza para calentar un gas o un líquido que luego se almacena o se distribuye. En los procesos fotovoltaicos, la energía solar se convierte en energía eléctrica sin ningún dispositivo mecánico intermedio. En la figura siguiente, se muestra las distintas tecnologías de aprovechamiento de la energía solar.

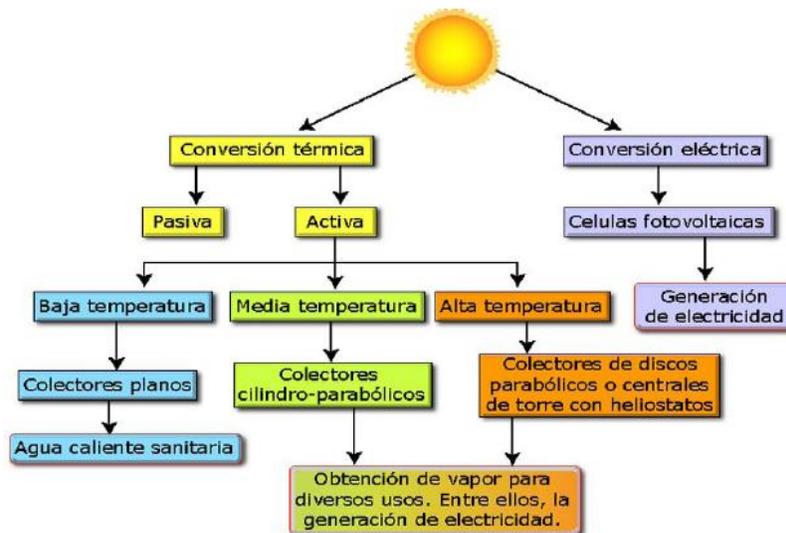


Figura 7. Calificación de las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar (Craig, Vaughan & Skinner, 2007)

2.2.1.2 El secado Solar

De acuerdo con Murthy (2009), al empezar el proceso de secado el producto es muy húmedo y su humedad es homogénea en toda la estructura del mismo tanto en la parte interna como externa; esta es la fase I. La humedad se presenta como una superficie de agua libre, esta es una superficie de evaporación. Tan pronto como la superficie del producto es secada la humedad migra desde el interior hacia la parte superficial, donde esta pueda ser evaporada; esta es la fase II. La energía requerida para este proceso es mucho mayor que la que se necesitaba en la primera fase solo para la evaporación del agua en la superficie libre. Esta fase dos depende en particular del alimento secado. La influencia de la temperatura es crítica en este proceso, existiendo un máximo permisible de temperatura de 15 a

20 °C más que la temperatura ambiente. El secado solar es una técnica que se usa desde tiempos ancestrales, sobre todo en el secado de productos agrícolas. inicialmente se aplicó el denominado secado al aire libre, en el cual el material era puesto sobre una superficie a que el sol le incida de manera directa, sin embargo la tendencia actual es a introducir secadores solares, los cuales, según el Intermediate Technology Development Group (ITDG) (1998), tiene las siguientes ventajas:

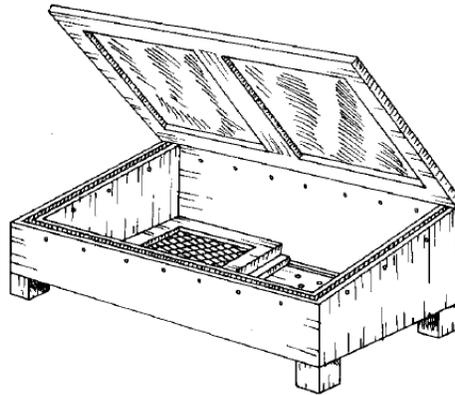
- a. Las temperaturas son más elevadas y en consecuencia los niveles de humedad alcanzados en los materiales son menores. Esto trae como resultado un secado más rápido y una humedad final menor.
- b. Las temperaturas elevadas que se generan actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de hongos en el caso del secado de productos alimenticios.
- c. El producto dentro de la secadora está protegido del polvo y de los insectos
- d. El ritmo de secado es más acelerado, y debido a su sistema de rejillas requiere de menor cantidad de terreno para extender el cultivo
- e. Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria mano de obra adicional para recoger el material

2.2.1.2.1 Los secadores solares

Los secadores solares son dispositivos diseñados y construidos para captar la energía solar y permitir la reducción de humedad de los materiales. Acorde a la forma de secado los secadores solares se pueden dividir en secadores solares directos, indirectos y mixtos (ITDG, 1998)

2.2.1.2.1.1 Secadores solares directos

En los secadores solares directos, el aire se calienta en una cámara de secado que cumple las funciones de colector solar y secadora. Entre los modelos más conocidos se encuentran el del tipo Brace o Lawand que se muestra en la figura 8.



**Figura 8. Secador solar tipo Brace o Lawand
(ITDG, 1998)**

La radiación solar pasa a través del techo transparente del secador (por lo general provista de una película de plástico o, en ocasiones, de vidrio) y calienta la cámara de secado de preferencia pintada de color negro para que absorba el máximo calor. El aire caliente se levanta y emerge de la cámara a través de los orificios de salida colocados en la parte superior de la pared trasera. Este es reemplazado por aire frío que ingresa a través de los orificios de entrada dispuestos en la base de la cámara. Se establece un flujo de aire que, combinado con la reducida humedad relativa del aire calentado, retira la humedad del producto. Para alcanzar un máximo de eficiencia y reducir la pérdida de calor, el techo de la secadora debe tener dos capas de vidrio o plástico. A través de las paredes de madera de la secadora es muy poco el calor que se pierde, pero sería mejor construir las paredes con materiales aislantes (ITDG, 1998)

2.2.1.2.1.2. Secadores solares indirectos

Un secador solar indirecto incluye dos partes: un colector solar que recibe la radiación del sol, y una cámara de secado que contiene el producto a secar y que se encuentra conectada al colector. Un típico secador indirecto es el modelo de Nuevo México que se muestra en la figura 8 de anexos y su esquema de funcionamiento en la figura 9.

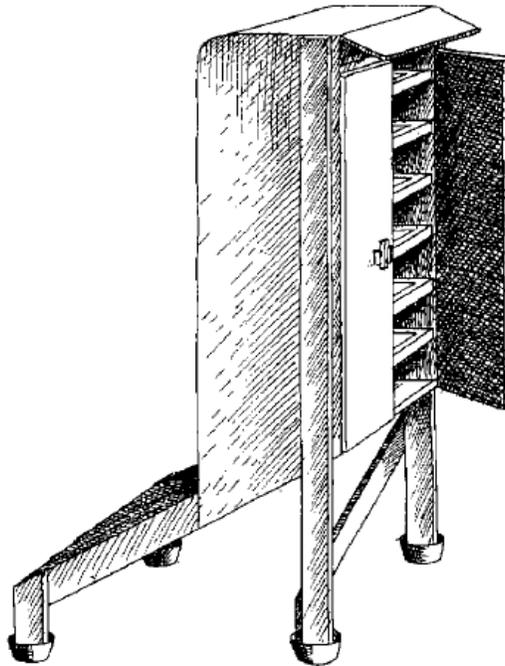


Figura 9. Secador solar indirecto tipo “Nuevo México” (ITDG, 1998)

El aire ingresa al colector, donde se calienta, de este modo se reduce el nivel de humedad por convección natural. Estos secadores deben adaptarse a las condiciones climáticas locales, al tipo de producto y a la disponibilidad de materiales de construcción. Durante la estación de secado será muy importante obtener información diaria y estacional a cerca de las variaciones que se producen con respecto a la cantidad de sol, el nivel de humedad, la temperatura, la velocidad y la dirección del viento (ITDG, 1998)

2.2.1.2.1.3 Secadores solares mixtos

Los secadores solares tienen algunas limitaciones. No puede usarse durante la noche y su nivel de eficiencia es menor en época de lluvias y alta nubosidad. Frecuentemente el producto no se seca por completo en un solo día, lo que trae como resultado su posible deterioro durante la noche, particularmente debido al desarrollo de hongos. Además, este tipo de secadores no está diseñado para aumentar en proporción hasta convertirse en unidades más grandes, sin que esto

represente problemas asociados con la construcción y la fragilidad de sus estructuras. Para enfrentar estos problemas, se han diseñado varios tipos de secadores mixtos que usan combustible para contar con una fuente de calor de reserva cuando esta se requiera. Uno de ellos es el secador McDowell descrita en la figura 10 (ITDG, 1998)

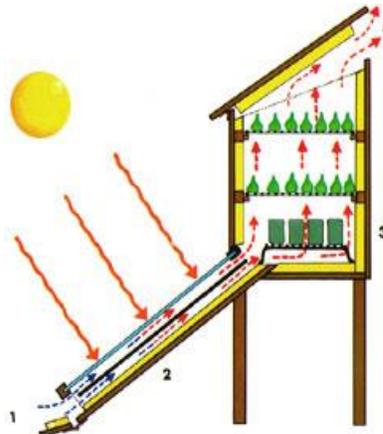


Figura 10. Esquema de Funcionamiento (ITDG, 1998)

La bandeja de secado con el producto se ubica debajo de un techo solar convencional provisto de doble hoja de material transparente. El aire ingresa a la cámara a través de los orificios situados debajo de la bandeja. Esta secadora tiene una caja de fuego conectada a tuberías de retención de calor que pasan por debajo de la bandeja hacia una chimenea externa. Cuando el clima es nuboso y/o durante la noche puede encenderse el fuego y el calor irradiará de la tubería, lo que permite que el producto siga secándose.

De acuerdo con Murthy (2009), los más populares y potenciales secadores dentro de la región Asia-pacífico son los secadores de tipo cabina de convección natural, los de tipo indirecto de aire forzado y los de tipo invernadero. También afirma que otro de los secadores de uso popular es el secador solar de túnel

2.2.2 La bioenergía y su uso

El biogás es un producto del metabolismo de bacterias metanogénicas que participan en la descomposición de tejidos orgánicos en ambiente húmedo y carente de oxígeno. Dependiendo del tejido orgánico a descomponer o fermentar,

el contenido de metano del biogás puede variar de un 50 por ciento hasta un 70 por ciento. Este proceso fermentativo es también dependiente de la temperatura y acidez del sistema. En la agricultura se utilizan biodigestores de concreto cerrados herméticamente con cubiertas plásticas, con temperatura controlada y con sistemas de agitación que permiten la homogenización del sustrato a fermentar. Para la producción de energía eléctrica a partir de biogás se utilizan motores a combustión especialmente diseñados para tal efecto y se acoplan con generadores eléctricos. En su comienzo la producción de biogás en Alemania se basaba principalmente en la fermentación de desechos orgánicos de la agricultura, como el estiércol. Hoy en día la producción se basa principalmente en la fermentación de cultivos. De hecho, algunos agricultores están utilizando nuevas tecnologías que permiten fermentar cultivos sin la necesidad de mezclarlos con estiércol (sistemas de monofermentación) (Kayser, 2009)

La mayoría de biomasa puede ser convertida a biogás, incluyendo restos humanos y de animales, residuos de cosechas y materiales de rellenos sanitarios (Khartha & Leach, 2001) (Murphy, McKeogh & Kiely, 2004)

3. Material y métodos

3.1. Tipo de estudio

La presente investigación es de tipo experimental.

3.2. Población y muestra

La población a considerar fue el territorio de la región Tumbes, en donde se encuentran asentadas las áreas de producción agrícola, entre las cuales destacan: arroz, banano, cacao, limón, etc., y en menor medida producción forestal como el caso de la producción de carbón vegetal y de algunos árboles frutales como la algarroba.

Los productos agroforestales seleccionados para los procesos de secado son banano y algarroba. Para los dos productos seleccionados se definió en un mapa las zonas de mayor producción, dividiéndose las mismas en sub-áreas de 10 has como unidades muestrales. Luego utilizando números aleatorios se eligió al azar 2 % de las áreas de donde se tomaron las muestras correspondientes para secarlas en el equipo a diseñar y construir.

3.3. Materiales y método de Investigación

3.3.1.- Pruebas preliminares

Se probó un prototipo de secador solar directo – indirecto, tipo túnel, acorde a la figura 11, con la finalidad de ser tomada como base para el diseño del secador contemplado en el presente estudio.

Este secador ha sido usado debido a su efectividad en diversos productos alimenticios incluido el banano y otras frutas de alta humedad (Munir *et al.*, 2013; Bala, 2009; Chavan, Yakupitiyage, & Kumar, 2011; Schirmer *et al.*, 1996 y Ong, 1999).

Este secador cuenta con dos partes básicas el colector, el cual consiste en una zona donde se concentra el calor con la finalidad de calentar el aire entrante al secador, y una segunda parte constituida por el área de colocación del material a ser secado. Adicional, el secador cuenta con dos ventiladores axiales de 220 V (15 x 15 cm) para la introducción de aire ambiental.



Figura 11. Secador solar directo-indirecto

El secador utilizado fue un secador tipo túnel construido de planchas de acero galvanizado, estructura de hierro y cubierta de vidrio. La sección transversal del túnel tiene forma triangular con 1.2 m de base y 0.7 m de altura. El largo del secador de es 4.8 m, de los cuales 0.8 m corresponden al colector y el resto (4 m) a la cámara de secado. El fondo del túnel se encuentra conformado por una triple capa, la cual está constituida de 2 planchas de acero galvanizado y una plancha de poliuretano de 1" de espesor, con la finalidad de evitar las pérdidas de calor en el fondo.

El material a secar en el experimento fue banano, el cual fue pelado, cortado en rodajas de aproximadamente 5 mm de espesor y sumergido en una solución de metabisulfito de potasio en una concentración de 1 g/l para contrarrestar los efectos de la oxidación. Las rodajas fueron colocadas sobre bandejas agujereadas metálicas para ser colocadas en el secador

Los parámetros medidos fueron los descritos en la tabla 1 e incluyen parámetros a medir en el propio secador y parámetros ambientales a tener en cuenta para el funcionamiento del mismo (Pontin *et al.*, 2005). Estas mediciones se realizaron con una periodicidad horaria durante 15 horas, en dos días.

Tabla 1. Parámetros medidos en los experimentos

Parámetro	Unidad	Equipo
Humedad del producto	%, g de agua/g de masa total	Balanza de Humedad Marca: OHAUS Modelo: MB45 Alcance: 45 g Valores de Temperatura: 50 a 200 °C Incrementos: 1 °C
Humedad relativa del aire entrante y saliente del secador	%	Higrómetro WTW – Merck
Temperatura del aire entrante y saliente del secador	°C	Anemometro/termómetro traceable VWR SCI USA – Merck
Velocidad de aire	°C	Anemometro/termómetro traceable VWR SCI USA – Merck
Temperatura ambiental	°C	Estación Meteorológica (Davis Ventage Pro2)
Humedad relativa ambiental	%	
Radiación Solar promedio	W/m ²	
Radiación solar máxima	W/m ²	
Índice UV	---	

Adicionalmente se hicieron observaciones en cuanto a los materiales y características de diseño general del equipo.

3.5.2. Diseño del prototipo de secador

El prototipo de secador diseñado y construido incluye dos partes, la primera parte un secador solar directo-indirecto con aire forzado, utilizando materiales inocuos para los alimentos y aislantes térmicos, estará dotado de un sistema de control de temperatura y humedad relativa y velocidad de viento.

Para la segunda parte del prototipo se evaluará el uso de biomasa, la cual consiste de materiales de desecho del cultivo de arroz (paja de arroz y cascara).

En cuanto a los materiales de construcción del prototipo, se priorizó materiales locales de bajo costo y de alto aislamiento calorífico para lograr retener la mayor cantidad del calor dentro del sistema.

3.5.3. Medición de la eficiencia del secador

La medición de la eficiencia del secador, desde el punto de vista técnico se hará mediante la evaluación de los siguientes parámetros:

- máximas temperaturas alcanzadas,
- curva de comportamiento de la humedad de aire,
- kilogramos de de biomasa utilizados/Kg de materia prima procesada,

La temperatura será medida en la entrada y salida del secador utilizando termómetros de mercurio, con la finalidad de construir curvas que permitan determinar la diferencia de temperatura entre el aire entrante y saliente básicamente. La humedad del aire entrante y saliente será también medida y graficada para determinar la variación del contenido de humedad del aire. La evaluación descrita anteriormente será realizada con el secador vacío y cargado de material.

Los dos parámetros adicionales mencionados serán medidos con el secador cargado de material utilizando básicamente métodos gravimétricos (pesado de los materiales).

3.5.4. Diseño de los procesos de secado

Se diseñaron procesos de secado para dos productos agroforestales, el banano y la algarroba. Para lo cual se construirán curvas de secado (curvas donde se grafica la disminución de la humedad del producto a través del tiempo) y se determinarán parámetros como Kg de material/horas de secado y Kg de producto/Kg de materia prima.

4.- Resultados

4.1 Pruebas Preliminares

En el anexo 1 se pueden apreciar las condiciones ambientales de los días donde se realizaron las pruebas preliminares de secado solar. Los días fueron el 06 y 07 de junio del 2013, días que corresponden a los últimos días de la estación de otoño en el hemisferio sur.

Nótese que las temperaturas promedio durante el desarrollo de los experimentos preliminares no superaron los 25.2 °C. Los días en los cuales los experimentos fueron llevados a cabo fueron nublados y parcialmente nublados, por lo que los resultados corresponderían a condiciones de mínima radiación solar comparados con días soleados o días durante el verano.

En los gráficos 12 y 13 se muestra la evolución de la radiación solar, teniéndose en consideración que los niveles alcanzados en los días de los experimentos son moderados con un máximo nivel de 518 W/m², que se presentó el primer día 05 de junio a las 3 pm.

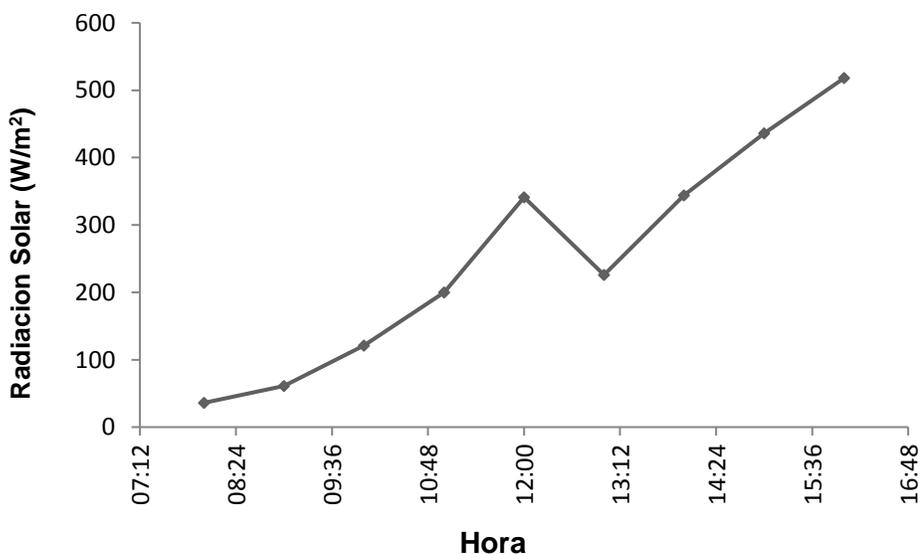


Figura 12. Evolución de la radiación solar (Día 1)

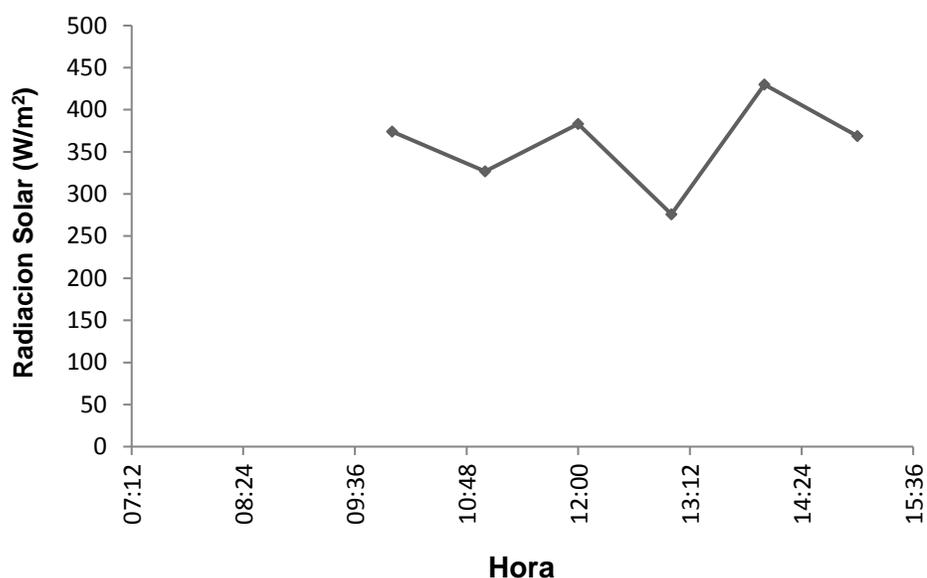


Figura 13. Evolución de la radiación solar (Día 2)

En la tabla 2 se aprecian los resultados de los parámetros medidos en el secador en función de las fechas y horas.

Tabla 2. Resultados de parámetros medidos en el secador

Dia	Hora	Humedad (%)	Humedad (kg/kg bs)	T.ent (°C)	T.sal (°C)	HR.ent(%)	HR.sal(%)
06/06/2013	8:00 AM	68.83	0,69	26,7	26,9	67	75
06/06/2013	9:00 AM	54.92	0,55	26,5	27,5	65	65
06/06/2013	10:00 AM	53.70	0,54	27,1	27,2	63	64
06/06/2013	11:00 AM	46.33	0,46	27,6	28,6	61	58
06/06/2013	12:00 PM	59.45	0,60	27	28	62	62
06/06/2013	1:00 PM	52.03	0,52	27,8	28,9	61	71
06/06/2013	2:00 PM	46.89	0,47	29,1	32,5	61	51
06/06/2013	3:00 PM	32.97	0,33	28,2	29,3	63	57
06/06/2013	4:00 PM	38.85	0,39	30	32,2	56	53
07/06/2013	10:00 AM	30.30	0,30	29,4	32,5	55	50
07/06/2013	11:00 AM	21.75	0,22	28,6	29,8	65	58
07/06/2013	12:00 PM	18.50	0,19	27,3	31	60	21,75
07/06/2013	1:00 PM	30.24	0,30	27,3	29,4	63	58
07/06/2013	2:00 PM	14.54	0,15	27,5	29,2	61	60
07/06/2013	3:00 PM	14.70	0,15	29,3	31,7	55	50

Los parámetros medidos fueron Humedad en %, Humedad en kg/Kg de base seca, temperatura del aire entrante del secador en °C (T_{ent}), temperatura del aire saliente del secador en °C (T_{sal}), humedad relativa del aire entrante (HR_{ent}) en % y la humedad relativa del aire saliente en % (HR_{sal}). En cuanto al contenido de humedad, se observa la pérdida de la misma por acción del secado desde un porcentaje inicial de 68.83 a 14.70 % (bh) o desde 0.69 a 0.15 kg/kg bs en el transcurso de 15 horas.

En la figura siguiente se muestra una comparación entre las temperaturas del aire entrante al secador y las temperaturas del aire saliente, notándose una leve superioridad de la temperatura de salida del secador, lo que indica que a pesar de las condiciones desfavorables de los experimentos la radiación solar que llega al secador permite de todos modos el secado directo e indirecto del material colocado en el secador

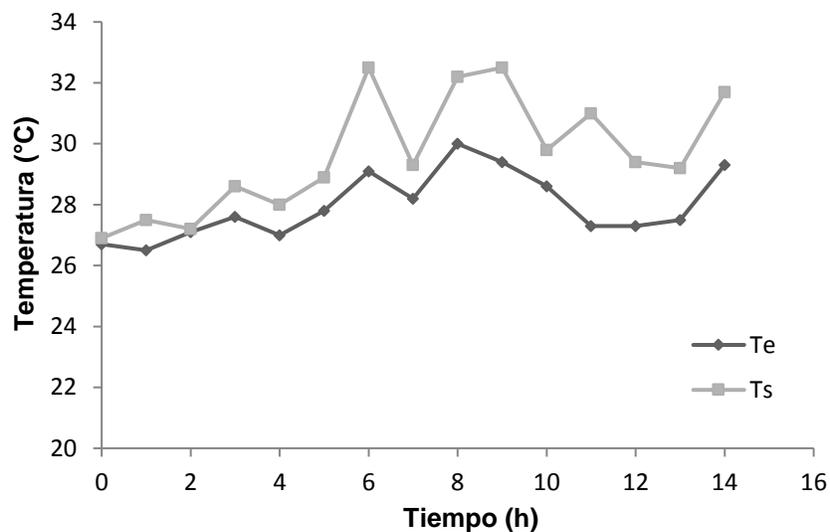


Figura 14. Comportamiento de la Temperatura en el aire entrante (T_e) y saliente del secador (T_s)

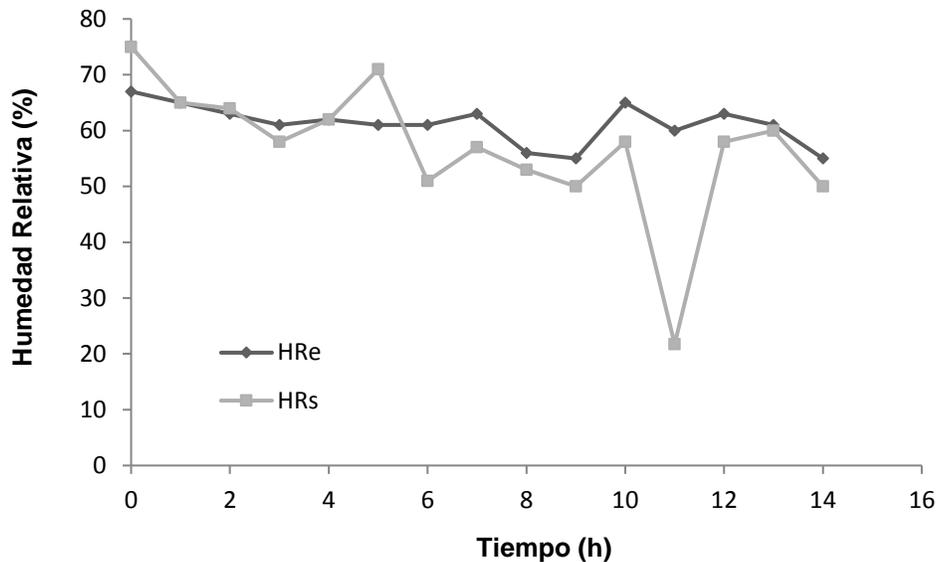


Figura 15. Comportamiento de la Humedad Relativa en aire de entrada (HRe) y salida del secador (HRs)

En la figura 16 se muestra la curva de descenso de la humedad del producto, teniendo un comportamiento exponencial debido a la facilidad de extracción del agua libre en los primeros estadios del secado y luego disminuye la velocidad de eliminación del agua porque el agua ligada está asociada a otros componentes de alimento y es más complicado de extraer (esto está de acuerdo a lo encontrado por Manjula *et al.*, 2011 y Kulanthaisami *et al.*, 2009 en otros productos).

En general se logra una eficiente pérdida de la humedad, haciéndolo aplicable a las condiciones experimentales que se requiere, sin embargo se ha observado la posibilidad de incorporar una fuente adicional de energía para hacer el secado continuo (Costa y Ferreira, 2007), dado que a partir de las 4 a 5 pm la radiación solar no es suficiente para seguir retirando agua del producto.

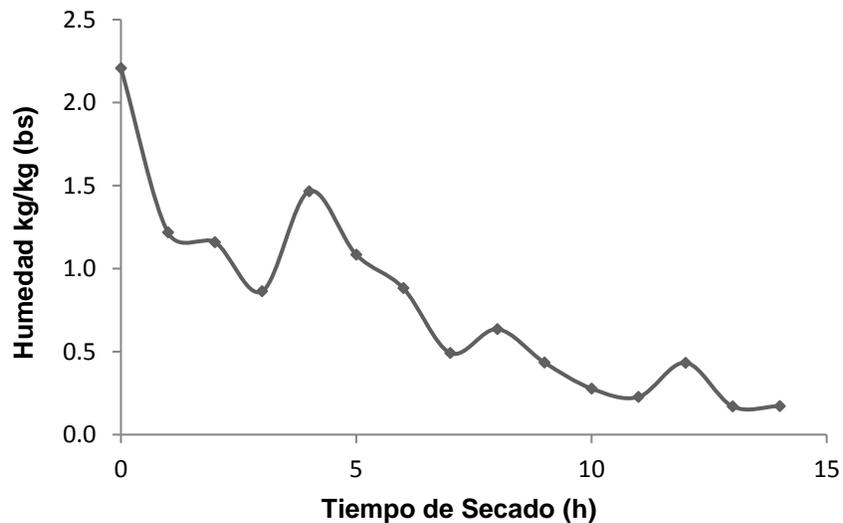


Figura 16. Curva de secado Banana

Los materiales del prototipo, incluyendo las bandejas, no fueron los adecuados para el procesamiento de alimentos por lo que tendrá que proponerse materiales que sean congruentes con la aplicación. Las fugas del secador producto de los espacios entre las juntas del prototipo no hacían eficiente el recorrido del aire en el material por lo que deberá idearse un sistema que permita lograr la hermeticidad (Miranda *et al.*, 2008). El espacio de la cámara de secado es subutilizado y considerando las temperaturas alcanzadas se podría modificar el sistema de colocación de las bandejas para lograr aumentar la capacidad del mismo quizás colocando entre una a dos hileras adicionales a la ya existente.

4.2. Diseño del prototipo de secador

Acorde a lo que se analizó con los experimentos preliminares se pudo determinar que el diseño base de secador analizado es eficiente, secando las rodajas de banano en un período de tiempo de 15 horas solo con secado solar. Sin embargo el prototipo inicial tuvo que ser modificado para su mejor funcionamiento; estas modificaciones incluirían:

- ❖ Cambiar materiales actuales por materiales más compatibles con los alimentos (acero inoxidable) y además materiales más livianos y duraderos, resistentes a la radiación ultravioleta del sol, lluvias y factibles de ser limpiados periódicamente;
- ❖ Incorporación un sistema complementario para hacer continuo el secado;
- ❖ Aumentar la hermeticidad del cuerpo del secador con la finalidad de evitar las pérdidas de calor del secador y la presencia de insectos y aves que puedan contaminar los productos
- ❖ Aumentar la capacidad del secador, hasta un nivel que la estabilidad mecánica del secador no sea afectada.

Basados en la información de las pruebas preliminares se optó por los siguientes materiales para el diseño: ángulos y T de acero de 0.3" de espesor, planchas de acero galvanizado de 0.2" de espesor, plancha de poliuretano de 2" de espesor y mantas de polietileno de baja densidad elaborado con materia prima virgen, sistema heavy duty, aditivo protector de radiación UV y de 0.008" de espesor.

Los ángulos y T de acero inoxidable se utilizaron para conformar la estructura del secador tanto los soportes como la estructura superior del secador que actúa como soporte de la manta plástica que lo cubre.



Figura 17. Sistema de anclaje del secador diseñado

En la figura 17 se puede apreciar el sistema el sistema del anclaje del secador conformado por ángulos de fierro ubicados cada 1 m de distancia. El fondo del secador (soporte del producto a secar) estuvo conformado de una triple capa de

planchas de acero galvanizado y la plancha de poliuretano. Esta triple capa permite que el calor captado en el secador no se pierda hacia la parte inferior del mismo.



Figura 18. Aislamiento térmico del secador de triple capa

El secador se diseñó y construyó para una capacidad de 400 Kg de producto base, en este caso se tomó el banano como producto de referencia, dado que este permitiría la obtención de aproximadamente entre 20 y 30 kg de producto terminado. El secador cuenta con dos partes, una que corresponde al colector solar que se encuentra pintada de color negro en su superficie y tiene un área de 6 m² (2 m de ancho y 3 m de largo); mientras que el area de secado es de 14 m² (2 m de ancho y 7 m de largo)

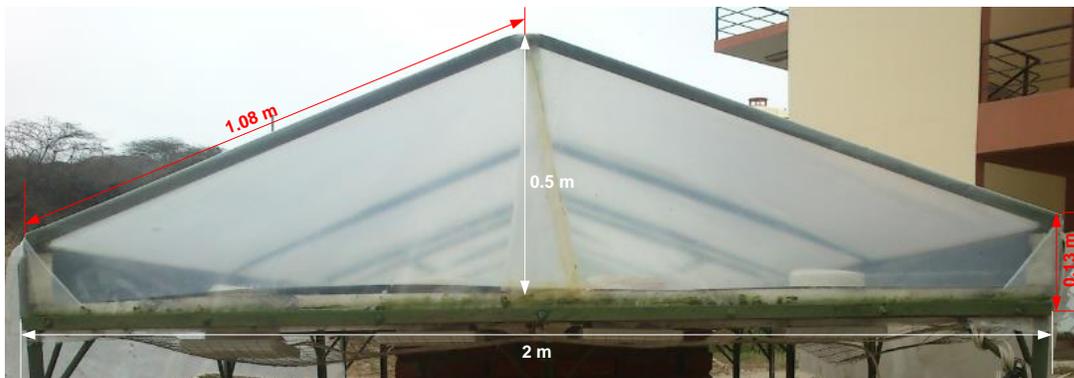


Figura 19. Dimensiones de la sección transversal del secador



Figura 20. Dimensiones del colector solar y el área de secado del secador

Se introdujo dentro del diseño la utilización de seis puertas colocadas a ambos lados del secador que permiten la colocación de las bandejas cargadas con producto al interior del secador. Estas puertas permiten la apertura parcial de producto y a diferencia de otros modelos de secador de túnel diseñados y contruidos evita la apertura total del secador y con ello la exposición de los productos a diversos factores de contaminación.



Figura 21. Puertas de entrada de bandejas cargadas de producto al secador

Para el sistema de ventilación se consideraron 4 extractores de aire colocados de tal manera que el aire entra del exterior al secador. Los extractores considerados fueron extractores axiales de la marca *Future* modelo 150 con una velocidad de 2540 RPM, 34 W de potencia y un caudal de descarga libre 300 m³/h (características completas se puede apreciar en el anexo)

Tabla 3. Resumen de las características de diseño del secador solar de Túnel diseñado

Parámetro	Valor	Unidad
Largo total	10	m
Ancho total	2	m
Largo de colector	3	m
Área de colector	6	m ²
Largo de área de secado	7	m
Área de secado	14	m ²
Área de sección transversal	0.63	m ²
Velocidad de viento	0.6	m/s
Volumen de aire	1360	m ³ /h

En el límite del área de secado y el colector solar se ha construido un compartimiento con la finalidad de ser usado cuando se combine el secado solar con otro tipo de energía complementaria que inicialmente se consideró la energía de biomasa.



Figura 22. Puertas de entrada de bandejas cargadas de producto al secador

Se montó un sistema alternativo basado en la quema de biomasa con calentamiento indirecto de agua (acorde a lo indicado por Amer *et al.*, 2010) y transferencia de calor al aire ingresante, tal como se aprecia en las figuras siguientes. La biomasa utilizada por el sistema fue paja de arroz y cascarilla de arroz.



Figura 23. Sistema de intercambio de calor instalado para el uso de energía alternativa a la energía solar



Figura 24. Sistema de intercambio de calor instalado para el uso de energía alternativa a la energía solar

El sistema mostró no ser efectivo, aportando un nivel bajo de energía que en condiciones de ausencia de energía solar no permitía elevar la temperatura a un nivel suficiente como para que se lleve a cabo el secado de los materiales.

Otro de los inconvenientes encontrados es que el tiempo de calentamiento del agua es significativamente alto hasta que se genere vapor, alrededor de 6 horas.

Fue complicado el uso de paja y pajilla de arroz, dado que se necesitarían excesivas cantidades de estos materiales y una cámara de quemado de grandes dimensiones para lograr obtener una cantidad de agua o aire caliente que alimenten el sistema de transferencia de calor de aire que calienta el aire entrante al secador y lograr un secado eficiente. Las pruebas desarrolladas permitieron apreciar que el quemado de estos materiales genera gran cantidad de gases y partículas a diferencia de la llama necesaria para el calentamiento.

Se pensó también en la alternativa de producir biogás, sin embargo conversando con especialistas del tema se determinaron desventajas que lo hacían técnicamente no factible, tales como que la cantidad de biogás necesaria era importante por lo que se hubieran necesitado no solo un biodigestor para su producción, dada la limitada cantidad de biogás que se puede obtener por cantidad de material. Otro de los inconvenientes es el excesivo tiempo que se necesita para producir el biogás, así como los exhaustivos cuidados que se tendrían en el mantenimiento del sistema de producción del gas.

Podría ser factible el uso de gas propano o gas natural como energía complementaria a la energía solar (Amer *et al.*, 2010) dado su alta capacidad calorífica, fácil accesibilidad, relativamente bajo costo y reducido efecto sobre el ambiente

El costo de construcción del equipo, incluyendo materiales de construcción, mano de obra e instalación fue de S/. 6800.00 (US\$ 2429). Otros secadores como un secador de invernadero desarrollado por Janjai *et al.* (2009) de 100 Kg de capacidad de secado de banana tienen un costo de US\$ 4563.

*

4.3. Medición de la eficiencia del secador

Las diferencias de temperaturas entre el aire entrante y la temperatura dentro del secador, permite apreciar la cantidad de calor que permite acumular el secador diseñado acorde al diseño utilizado.

En cuanto a la eficiencia del secador, en las gráficas a continuación se muestran los resultados de los diferentes parámetros medidos en el secador, tales como temperaturas del aire entrante, saliente y en el cuerpo del secador en dos días distintos. Igualmente se muestra la evolución de la radiación solar durante los días en que se realizaron las mediciones.

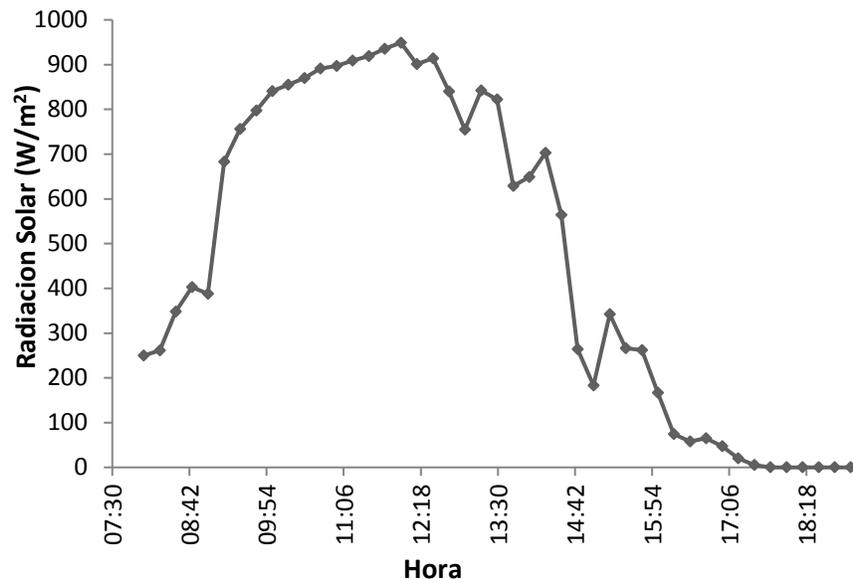


Figura 25. Comportamiento de la Radiación Solar durante el proceso de secado (06/10/13)

Para el primer día de medición (06 de octubre del 2013) el nivel de radiación solar superó los 900 W/m^2 cerca del mediodía y la diferencia entre la temperatura en el aire de entrada al secador y en el interior del secador llegó a ser como máximo de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ y como mínimo $1 \text{ }^\circ\text{C}$ en horas de la tarde.

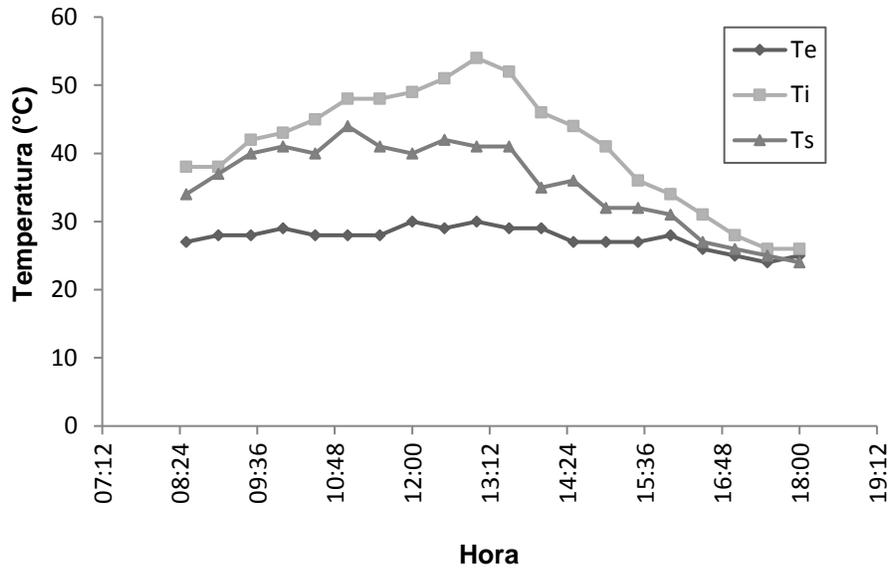


Figura 26. Comportamiento de la Temperatura a la entrada del secador (Te), en la entrada del secador (Te) y en la parte interna del mismo (Ti) durante el proceso de secado

Para el segundo día de análisis (27 de noviembre del 2013) el nivel de radiación solar superó los 900 W/m^2 cerca de las 10 am y la diferencia entre la temperatura en el aire de entrada al secador y en el interior del secador llegó a ser como máximo de $26 \text{ }^\circ\text{C}$ y como mínimo $6 \text{ }^\circ\text{C}$ en horas de la mañana. Se debe tener en cuenta que el día en cuestión fue parcialmente nublado acorde al reporte meteorológico.

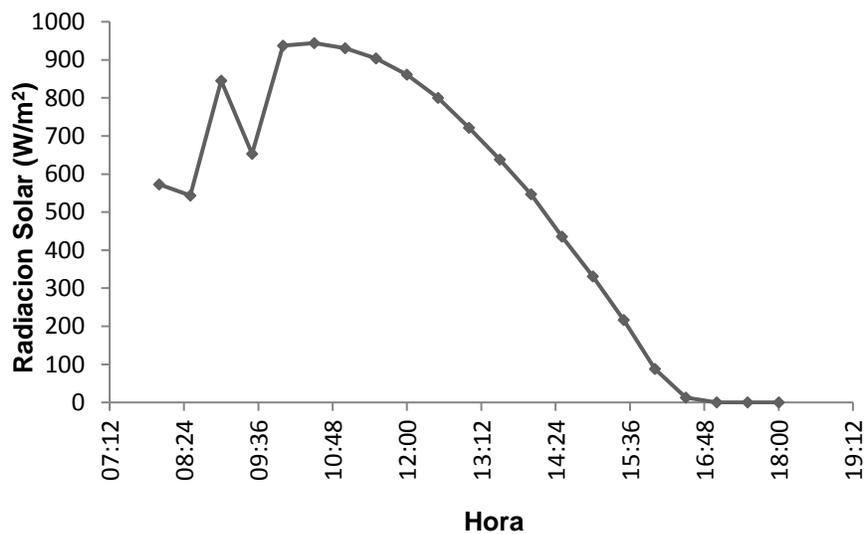


Figura 27. Comportamiento de la Radiación Solar durante el proceso de secado (27/11/2013)

Acorde a este máximo de radiación solar en los días de medición (cerca de 900 W/m²) y al área del compartimiento de secado (14 m²) el secador podría recibir durante un momento determinado una cantidad de energía directa de 12.6 KW.

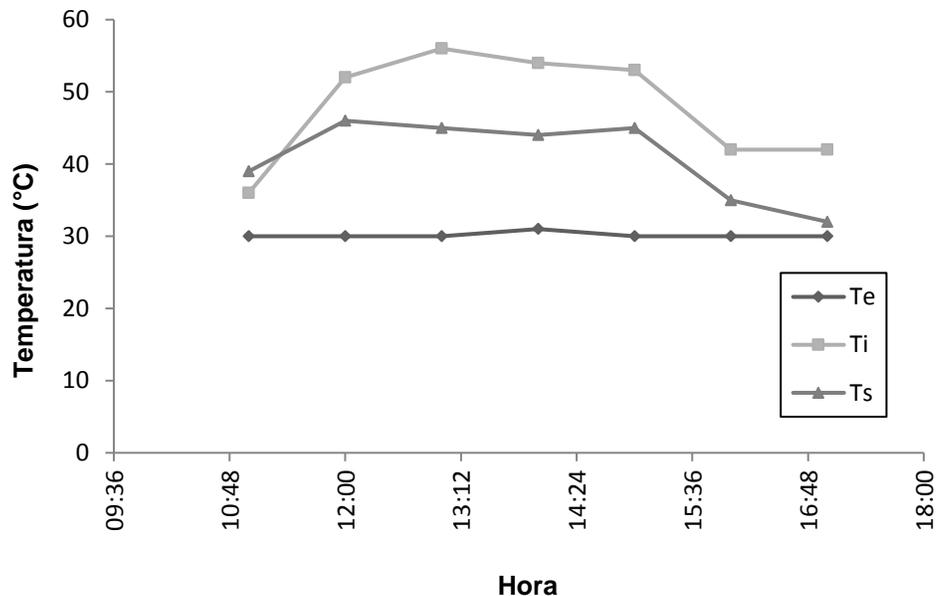


Figura 28. Comportamiento de la Temperatura fuera del secador (Te), en la entrada del secador (Te) y en la parte interna del mismo (Ti) (27/11/2013)

Las diferencias entre las temperaturas de aire entrante y saliente de hasta 26 °C en el mejor de los casos de acuerdo a las condiciones meteorológicas de los días en los que se realizaron las pruebas resulto ser inferior que lo encontrado por ejemplo por Amer (2010) de entre 30 y 40 °C; y superior a los encontrado por Gbaha *et al.* (2007) de hasta 20 °C, Hassanain (2009) de máximo 15 °C. La diferencia con los secadores comparados es que el secador del presente estudio es un secador de mediana escala y los resultados solo muestran el uso de energía solar.

4.4. Diseño de los proceso de secado

En las figuras 23 y 24 se muestran las curvas de secado de algarroba y banano respetivamente. El el eje x se aprecia el tiempo de secado en horas, mientras que en el eje y se muestra la humedad del producto en unidades de kg de agua por kg de materia seca. El secado de ambos materiales se realizó de forma simultánea el día 06 de octubre del 2013 y las condiciones meteorológicas y parámetros medidos en el secador fueron los mismos que los descritos en la parte anterior para la fecha mencionada.

Para el caso de la algarroba el tiempo de secado en el cual se alcanza la humedad de equilibrio (mínima unidad que se puede conseguir a las condiciones del experimento) se logra en un periodo de tiempo reducido de aproximadamente 5 horas, mientras que para el caso del banano la humedad de equilibrio se logró luego de las doce horas del experimento.

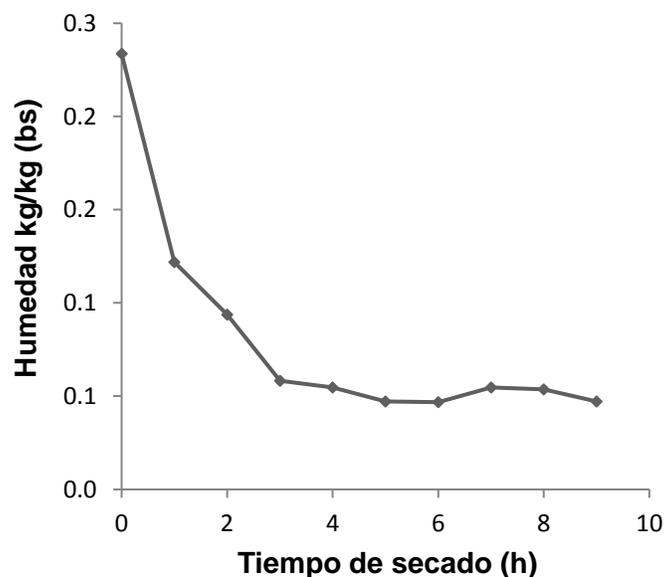


Figura 29. Curva de secado de Algarroba

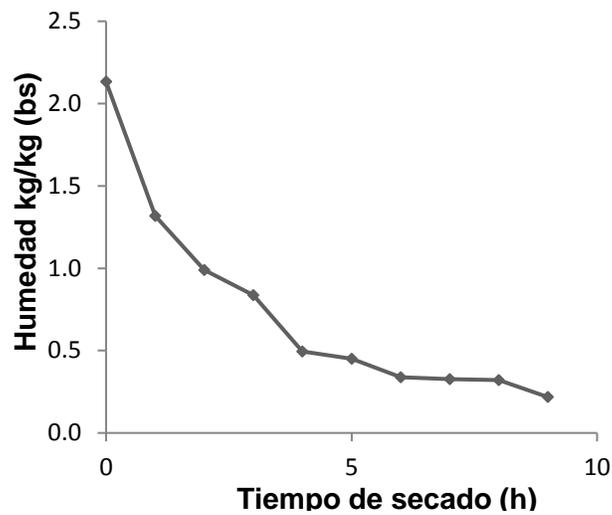


Figura 30. Curva de secado de banana

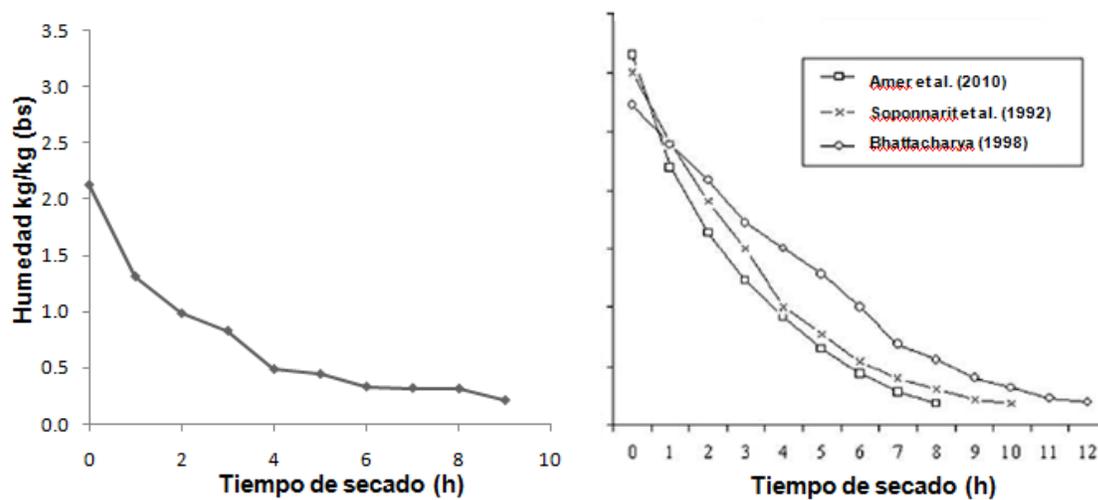


Figura 31. Curvas de secado obtenidas por diferentes autores para el banana

En la figura 31 se puede apreciar la comparación de la curva de secado de banana utilizando diferentes sistemas de secado a pequeña escala: Amer *et al.* (2010) un secador solar híbrido de 40 Kg de capacidad, Soponnarit *et al.* (1992) un secador solar con un calentador eléctrico de no más de 20 Kg de capacidad, Bhattacharya (1998) un sistema híbrido solar con quema de biomasa de muy baja producción. A pesar de que la humedad del banana en el presente estudio es menor a la humedad en los distintos estudios (producido probablemente por la diferencias en la variedad y grado de maduración con el resto de estudios) el

tiempo de secado a las condiciones ambientales de Tumbes permiten el secado de banano en un tiempo de entre 9 a 10 horas solamente con energía solar.

Otra de las diferencias con los estudios citados es la capacidad del secador, la capacidad de 400 Kg en el presente estudio supera ampliamente la capacidad del resto de estudios.

5.- Conclusiones

- ❖ Es técnicamente factible la aplicación de la energía solar en las condiciones meteorológicas de la región Tumbes para el secado de productos agroforestales, sin embargo no se llegó a demostrar el uso de la bioenergía como elemento complementario durante el secado solar de banano y algarroba.
- ❖ El secador solar de túnel diseñado con materiales de bajo costo es eficiente para su uso en el secado de productos agro-forestales como banano y algarroba, llegándose a aumentar la temperatura interna en el secador en un valor de hasta +26 °C comparado con la temperatura fuera del mismo y a la captación directa de energía solar de máximo 12.6 KW de manera puntual. Sin embargo la eficiencia disminuye obviamente en horas de menor radiación solar.
- ❖ El banano logro ser deshidratado en el secador diseñado desde una humedad de 68.8 % (bh) o 0.2 kg de agua/kg de materia seca hasta 17.87 % (bh) o 0.1 kg de agua/kg de materia seca en un periodo de tiempo de 10 horas; mientras que para el caso de la algarroba se logró reducir la humedad de 18.94 % (bh) o 0.2 kg de agua/kg de materia seca hasta 4.5 % (bh) o 0.05 kg de agua/kg de materia seca en un periodo de timepo de 5 horas.

6.- Recomendaciones

- ❖ Es necesaria la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los productos obtenidos en el secador diseñado para asegurar la inocuidad de los productos producidos.
- ❖ Podría evaluarse la incorporación de materiales de cobertura más resistentes que la manta de polietileno de baja densidad por materiales más resistentes como las planchas de policarbonato.
- ❖ Debe evaluarse la posible presencia de fugaz de calor en el secador solar diseñado, dado que podrían existir muchos puntos sobre todo en juntas en donde se podría estar perdiendo energía con lo que se podría aumentar la eficiencia del secador.
- ❖ Deben realizarse pruebas de secado con otros productos de alta producción dentro de la región Tumbes, tales como por ejemplo langostino o incluso usarse como tecnología alternativa en el secado de productos que ya se vienen secando en otras condiciones como es el caso del cacao.

7. – Bibliografía

- Adeyanju A. (2008). Effect of seeding of wood-ahs on biogas production using pig waste and cassava peels. *Journal of Engineering and applied sciences*, 3(3): 242-245.
- Amer, B. M. A., Hossain, M. A., & Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 813-820.
- Bhattacharya, S. C., Ruangrunghchaikul, T., & Pham, H. L. (2000). Design and performance of a hybrid solar/biomass energy powered dryer for fruits and vegetables. In *World renewable energy congress* (pp. 1161-1164).
- Bala, B. K. (2009, January). Solar drying of fruits, vegetables, spices, medicinal plants and fish: Developments and Potentials. In *International Solar Food Processing Conference* (pp. 14-16).
- Bond B., Espinoza O., Araman P. (2011). *Diseño y operación de un secador solar de madera para países tropicales*. Estados Unidos (USA): Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio Forestal Estación de Investigación Sur - Informe Técnico General SRS-134
- Cao G., Zhang X., Wang Y. & Zheng F. (2008). Estimation of emissions from field burning of crop straw in China. *Chinese Science Bulletin*, 53(5), 784-790.
- Chavan, B. R., Yakupitiyage, A., & Kumar, S.(2011). Drying performance, quality characteristics, and financial evaluation of Indian Mackerel (*Rastrilliger kangurta*) dried by a solar tunnel dryer. *Thammasat Int. J. Sc. Tech*, 16(2), 11-25.
- Christian, T. J., Kleiss, B., Yokelson, R. J., Holzinger, R., Crutzen, P. J., Hao, W. M. (2003). Comprehensive laboratory measurements of biomass-burning emissions: 1. Emissions from Indonesian, African, and other fuels. *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 4719-4732.
- Costa A. & Ferreira S. (2007). Sistema de Secado Solar para Frutos Tropicales. *Información Tecnológica* 18(5):49-58.

- Craig J., Vaughan D. & Skinner J. (2007). *Recursos de la Tierra: Origen, Uso e Impacto Ambiental*. Madrid (ES): Pearson- Prentice Hall
- Ezekoye V. & Okeke C.(2006). Design, Construction, and Performance Evaluation of Plastic Biodigester and the Storage of Biogas. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 7(2): 176 - 184
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30.
- Gbaha, P., Yobouet Andoh, H., Kouassi Saraka, J., Kaménan Koua, B., & Toure, S. (2007). Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renewable energy*, 32(11), 1817-1829.
- Hassanain, A. A. (2009). Simple solar drying system for banana fruit. *World J. Agric. Sci*, 5, 446-455.
- Havrland B., Hutla P. & Adamovský D. (2010). Experimental biomass dryer. *Agricultura tropica et subtropica*, 43 (1): 19-28.
- ITDG. (1998). *Técnicas de Secado*. Peru (PE): Intermediate technology development group
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C., & Khamvongsa, V. (2011). A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3), 1053-1062.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B. K., Nagle, M., & Müller, J. (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy*, 83(9), 1550-1565.
- Jenkins B M, Turn S Q, Williams R B. (1996). *Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations*, Vol 1. California State Air Resources Board U.S. Environmental Protection Agency, (NTIS PB97-133037)
- Kartha S. & Leach G. (2001). *Using modern bioenergy to reduce rural poverty*. Sweden(SW): Stockholm Environmental institute - Shell Foundation.

- Kayser F. (2009). Producción de energía a partir de residuos orgánicos y cultivos agrícolas-la experiencia de Europa y el potencial para Chile. *Cuadernos de difusión CEIUC*, 3(2): 31-40.
- Khadwilard, A., & Chunkaew, P. (2011). Modified Hot Air Dryer by Leaf Stove for Banana Drying. *Energy Procedia*, 9, 344-350.
- Koua, K. B., Fassinou, W. F., Gbaha, P., & Toure, S. (2009). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy*, 34(10), 1594-1602.
- Kulanthaisami S., Subramanian P., Mahendiran R., Venkatachalam P. & Sampathrajan A. (2009). Drying Characteristics of Coconut in Solar Tunnel Dryer. *Madras Agric. J.*, 96 (1-6): 265-269.
- López-Vidaña, E. C., Méndez-Lagunas, L. L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. *Solar Energy*, 93, 23-31.
- Manjula B., Ramachandra C., Udaykumar N., Devadattam K. &Sharanakumar H. (2011). Drying Characteristics of ByadagiChilli (*Capsicum annuum* Linn.)Using Solar Tunnel Dryer.*J. Agric. Food. Tech.*, 1(4): 38-42
- Martina P., Yank L., Corace J., Bucki Wasserman B., Aeberhard R. &Ventín A. (2005). Estudio de la producción de biogas en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor del tipo de carga única o batch. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9(6):23-27.
- Miranda A, Miranda R & Jimenez J. (2008). Solar drying system for the agro-products dehydration.*J. Agri. Soc. Sci.*, 04: 135–40
- Munir, A., Sultan, U., & Iqbal, M. (2013). Development and performance evaluation of a locally fabricated portable solar tunnel dryer for drying of fruits, vegetables and medicinal plants. *Pak. J. Agri. Sci*, 50(3), 493-498.
- Murphy J., McKeogh E. & Kiely G. (2004). Technical/economic/environmental analysis of biogas utilization. *Applied Energy*, 77:407–427.
- Murthy, M. V. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 835-844.

- Ofoefule A. & Uzodinma E. (2009). Biogas production from blends of cassava (*Manihot utilissima*) peels with some animal wastes. *International Journal of Physical Sciences*, 4(7): 398-402.
- Ong KS. (1999). Solar dryers in the Asia-Pacific region. *Renewable Energy*, 16:779–84
- Pontin M., Lema A., Ritta R., Sanmartino A., Ghirardotto M. (2005). Secadero solar para frutas: estudio de caso. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9:2.43-2.48
- Saev M., Koumanova B. & Simeonov I. (2009). Anaerobic co-digestion of wasted tomatoes and cattle dung for biogas production. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 44(1): 55-60.
- Schirmer, P., Janjai, S., Esper, A., Smitabhindu, R., & Mühlbauer, W. (1996). Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas. *Renewable Energy*, 7(2), 119-129.
- Soponronnarit, S., Dussadee, N., Hirunlabh, J., Namprakai, P., & Thepa, S. (1992). Computer simulation of solar-assisted fruit cabinet dryer. *Reric Int Energ J.*, 14(1), 59-70.
- Tipayarom, D., & Kim Oanh, N. T. (2007). Effects from open rice straw burning emission on air quality in the Bangkok Metropolitan Region. *Science Asia*, 33(3): 339–345.
- Trebejo I. (1998). *Atlas de energía solar del Perú. Proyecto PER/98/G31: electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú*. Perú (PE): SENAMHI - MEM
- Viglasky J., Langova N & Horbaj P. (2006). A solar timber-dryer equipped with an air collector. *Komunikácie/Communications*, 2: 5 – 9.
- Zhang, H., Ye, X., Cheng, T., Chen, J., Yang, X., Wang, L. (2008). A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: emission factors and emission inventory. *Atmospheric Environment*, 42(36): 8432–8441.

ANEXOS

Anexo 1. Condiciones ambientales durante el secado en las pruebas preliminares

Día	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Punto de rocío (°C)	Radiación Solar (w/m²)	Indice UV
06/06/2013	8:00 AM	22.8	88	20.7	36	0
06/06/2013	9:00 AM	22.9	88	20.8	61	0
06/06/2013	10:00 AM	22.9	88	20.8	121	0.8
06/06/2013	11:00 AM	23.4	87	21.2	200	1.5
06/06/2013	12:00 PM	23.7	86	21.2	341	2.8
06/06/2013	1:00 PM	24.1	84	21.2	226	2.0
06/06/2013	2:00 PM	24.2	85	21.5	344	3.0
06/06/2013	3:00 PM	24.5	84	21.6	436	4.1
06/06/2013	4:00 PM	24.9	83	21.8	518	2.9
07/06/2013	10:00 AM	23.7	87	21.4	374	2.4
07/06/2013	11:00 AM	25.0	85	22.3	327	3.6
07/06/2013	12:00 PM	25.2	84	22.3	383	3.7
07/06/2013	1:00 PM	24.8	84	21.9	276	2.8
07/06/2013	2:00 PM	24.7	83	21.6	430	3.0
07/06/2013	3:00 PM	24.1	84	21.2	369	2.2

**Anexo 2. Medición de parámetro meteorológicos durante el secado de los materiales
(pruebas con banano y algarroba)**

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Punto de Rocio (°C)	Radiación Solar (W/m ²)	Índice UV
06/10/2013	08:00 a.m.	23.2	21.3	250	1.7
06/10/2013	08:15 a.m.	23.8	21.5	261	1.7
06/10/2013	08:30 a.m.	24.3	21.8	348	2.7
06/10/2013	08:45 a.m.	24.6	21.9	403	3
06/10/2013	09:00 a.m.	24.7	22	388	3.2
06/10/2013	09:15 a.m.	25	21.9	683	4.7
06/10/2013	09:30 a.m.	25.1	22	756	5
06/10/2013	09:45 a.m.	25.3	22.2	797	5.5
06/10/2013	10:00 a.m.	25.3	22	841	5.9
06/10/2013	10:15 a.m.	24.9	21.7	855	6.2
06/10/2013	10:30 a.m.	24.8	21.7	870	6.5
06/10/2013	10:45 a.m.	24.7	21.6	891	6.8
06/10/2013	11:00 a.m.	24.8	21.5	897	6.9
06/10/2013	11:15 a.m.	24.8	21.7	909	7
06/10/2013	11:30 a.m.	24.7	21.8	919	7.1
06/10/2013	11:45 a.m.	24.8	21.7	935	6.9
06/10/2013	12:00 p.m.	24.8	21.5	949	6.8
06/10/2013	12:15 p.m.	24.9	21.6	901	6.6
06/10/2013	12:30 p.m.	25.3	21.8	914	6.3
06/10/2013	12:45 p.m.	25.6	22.3	840	5.4
06/10/2013	01:00 p.m.	25.3	22	755	5.1
06/10/2013	01:15 p.m.	25.7	22.2	842	5.1
06/10/2013	01:30 p.m.	26.2	22.5	822	4.6
06/10/2013	01:45 p.m.	26.4	22.7	629	3.7
06/10/2013	02:00 p.m.	26.1	22.5	649	3.3

06/10/2013	02:15 p.m.	25.8	22.3	703	3.1
06/10/2013	02:30 p.m.	25.6	22.3	564	2.5
06/10/2013	02:45 p.m.	25.4	22.1	264	1.5
06/10/2013	03:00 p.m.	24.8	21.9	183	1.2
06/10/2013	03:15 p.m.	24.4	21.5	342	1.3
06/10/2013	03:30 p.m.	24.4	21.8	266	1
06/10/2013	03:45 p.m.	24.1	21.4	262	0.8
06/10/2013	04:00 p.m.	23.9	21.2	167	0.2
06/10/2013	04:15 p.m.	23.6	20.9	74	0
06/10/2013	04:30 p.m.	23.4	20.9	58	0
06/10/2013	04:45 p.m.	23.2	20.7	65	0
06/10/2013	05:00 p.m.	23.1	20.8	47	0
06/10/2013	05:15 p.m.	22.9	20.7	20	0
06/10/2013	05:30 p.m.	22.8	20.6	5	0
06/10/2013	05:45 p.m.	22.8	20.6	0	0
06/10/2013	06:00 p.m.	22.9	20.8	0	0
06/10/2013	06:15 p.m.	22.9	20.8	0	0
06/10/2013	06:30 p.m.	22.9	20.8	0	0
06/10/2013	06:45 p.m.	22.8	20.7	0	0
06/10/2013	07:00 p.m.	22.8	20.7	0	0

Anexo 3. Medición de parámetro meteorológicos para medir la eficiencia del secador

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Punto de Rocío (°C)	Radiacion Solar (W/m ²)	Índice UV
27/11/2013	08:00 a.m.	26.2	20.5	573	3.5
27/11/2013	08:30 a.m.	27.4	21.2	544	3.7
27/11/2013	09:00 a.m.	28.4	21.9	845	4.7
27/11/2013	09:30 a.m.	28.1	21.6	653	5
27/11/2013	10:00 a.m.	28.4	22	937	6.5
27/11/2013	10:30 a.m.	28.9	22	944	6.6
27/11/2013	11:00 a.m.	29.3	21.5	931	6.4
27/11/2013	11:30 a.m.	29.8	22.2	904	6
27/11/2013	12:00 p.m.	29.6	23	861	5.3
27/11/2013	12:30 p.m.	29.1	22.5	800	4.2
27/11/2013	01:00 p.m.	28.3	22.3	722	3.4
27/11/2013	01:30 p.m.	27.7	21.9	638	2.6
27/11/2013	02:00 p.m.	26.8	21.8	547	1.9
27/11/2013	02:30 p.m.	26.5	21.3	436	1.2
27/11/2013	03:00 p.m.	26.5	21.5	331	0.7
27/11/2013	03:30 p.m.	26.1	21.3	217	0
27/11/2013	04:00 p.m.	25.7	21.1	88	0
27/11/2013	04:30 p.m.	25	20.7	13	0
27/11/2013	05:00 p.m.	24.5	20.6	0	0
27/11/2013	05:30 p.m.	24.2	20.5	0	0
27/11/2013	06:00 p.m.	24.2	21	0	0

Anexo 4. Anexo Fotográfico



Foto 1. Construcción del secador en taller



Foto 2. Montaje del cuerpo del secador en Ciudad Universitaria



Foto 3. Montaje de la plancha de poliuretano



Foto 4. Instalación de la planchas de acero galvanizado encima de la plancha de poliuretano



Foto 5. Pintado del colector solar



Foto 7. Espacio para el montaje de los ventiladores



Foto 7. Construcción del secador en taller



Foto 8. Equipo medidor de humedad



Foto 9. Secado de algarroba



Foto 10. Slides de banano colocados en las bandejas



Foto 11. Secado de banano en el secador solar



Foto 12. Medicion de los diferentes parámetros de secado



Foto 13. Construcción del secador en taller



Foto 14. Construcción del secador en taller



Foto 15. Tanque de calentamiento de agua



Foto 16. Estructura construida de ladrillo donde se instaló el intercambiador de calor

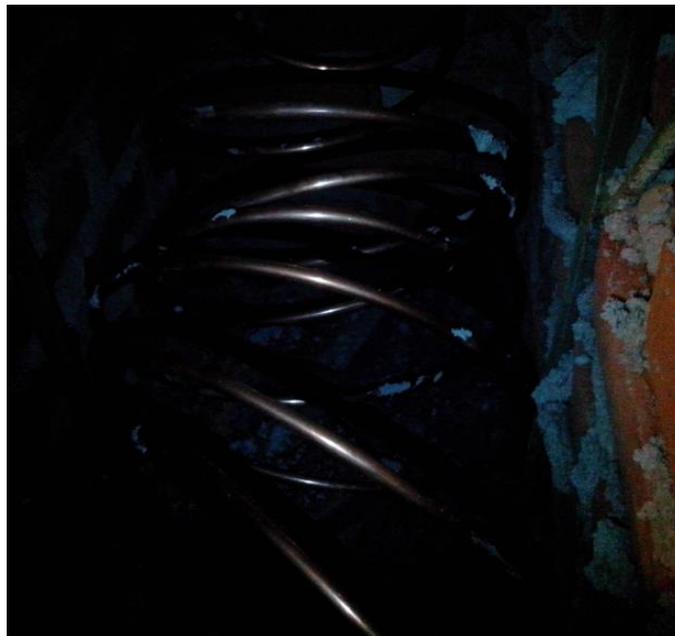


Foto 17. Tubo de cobre para la transferencia de calor del agua caliente al aire entrante al secador

