

**Desarrollo de un prototipo de destilador  
solar para obtener bioetanol a partir de vino  
de mango (*Mangifera indica* L.)**

**Yermy Esther Balcázar Suárez**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2008

ZAMORANO  
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

# **Desarrollo de un prototipo de destilador solar para obtener bioetanol a partir de vino de mango (*Mangifera indica* L.)**

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Agroindustria Alimentaria en el Grado Académico de Licenciatura.

Presentado por

**Yermy Esther Balcázar Suárez**

**Zamorano, Honduras**  
Diciembre, 2008

# **Desarrollo de un prototipo de destilador solar para obtener bioetanol a partir de vino de mango (*Mangifera indica* L.)**

Presentado por:

Yermy Esther Balcázar Suárez

Aprobado:

---

Rodolfo Cojulún, M.Sc.  
Asesor Principal

---

Luis Fernando Osorio, Ph.D.  
Director  
Carrera Agroindustria Alimentaria

---

Luis Fernando Osorio, Ph.D.  
Asesor

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

---

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.  
Rector

## RESUMEN

Balcázar, Y. 2008. Desarrollo de un prototipo de destilador solar para obtener bioetanol a partir de vino de mango (*Mangifera indica* L.). Proyecto de Graduación del Programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 32 p.

En el Campus de Zamorano el desperdicio de fruta madura de mango es alto; sin embargo, los mangos se pueden aprovechar para obtener bioetanol, y debido al alto costo de combustibles fósiles es deseable estudiar ésta alternativa. El objetivo general del estudio fue desarrollar un prototipo de destilador continuo, utilizando energía solar en sustitución a los combustibles fósiles, para obtener bioetanol. Con esta finalidad se evaluaron dos rangos de temperatura ambiente ( $<30^{\circ}\text{C}$ ,  $>30^{\circ}\text{C}$ ) efectuándose los tratamientos a un mismo caudal de alimentación del vino (300 ml/min) hacia el área de destilación, con una duración de 55 minutos para cada corrida. Se utilizó un diseño experimental DCA con 2 tratamientos y 3 repeticiones para un total de 6 unidades experimentales, con un análisis de varianza (ANDEVA) para analizar los datos recopilados y un análisis de separación de medias de TUKEY con un nivel de significancia de  $P<0.05$ . Se evaluó la eficiencia del prototipo de destilador solar midiendo la cantidad de bioetanol recuperado por medio de este aparato, teniendo como referencia el bioetanol contenido en el vino de mango. Se determinó que el tratamiento más efectivo de los dos analizados fue el rango de temperatura ambiente  $>30^{\circ}\text{C}$ , ya que se obtuvo en promedio la mayor cantidad de alcohol que fue 82 ml, equivalente a un destilado al 26.7% de concentración alcohólica.

**Palabras clave:** Alcohol etílico, energía alternativa, energía renovable, energía solar, frutas de descarte.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>7</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>18</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>19</b>
<b>7. RECONOCIMIENTOS.....</b>	<b>20</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>21</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>23</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1. Tratamientos en la destilación de vino de mango.....	9
2. Fechas de realización de los tratamientos.....	10
3. Asignación de tratamientos (DCA).....	10
4. Pruebas con el destilador solar sin área de precalentamiento.....	12
5. Pruebas con el destilador solar con área de precalentamiento.....	12
6. Temperaturas analizadas durante el proceso .....	13
7. Cantidad de alcohol total destilado.....	13
8. Relación de temperatura ambiente con la cantidad de alcohol destilado...	13
9. Relación de temperatura en el centro del destilador con el porcentaje de alcohol obtenido en el vino.....	14
10. Porcentaje de alcohol en el vino final (residuo).....	14
11. Efectividad del destilador solar continuo.....	14
12. Porcentaje de pureza del alcohol (%)......	15
13. Porcentaje de alcohol residual en el vino de mango (%)......	15
14. Temperatura ambiente efectiva (°C).....	15
15. Correlación de temperatura ambiente y alcohol destilado (ml).....	16
16. Correlación de temperatura ambiente y porcentaje de alcohol destilado...	16
17. Correlación de temperatura central y porcentaje de alcohol residual.....	16
18. Correlación de temperatura central y porcentaje de alcohol destilado.....	17
Figura	Página
1. Estructura química del alcohol etílico (etanol).....	4
2. Distribución de fuentes de energía.....	6
3. Flujo de proceso de destilación de vino de mango.....	8
Anexo	Página
1. Cuadro del SAS para cantidad de alcohol destilado (ml).....	24
2. Cuadro del SAS para porcentaje de alcohol (pureza).....	25
3. Cuadro del SAS para porcentaje de alcohol residual en el vino.....	26
4. Cuadro del SAS para temperatura ambiente.....	27
5. Cuadro del SAS para correlación de temperatura ambiente y alcohol destilado (ml).....	28
6. Cuadro del SAS para correlación de temperatura ambiente y pureza del alcohol destilado (%)......	28
7. Cuadro del SAS para correlación de temperatura en el centro del destilador y el alcohol residual en el vino.....	29
8. Cuadro del SAS para correlación de temperatura en el centro del destilador y la pureza del alcohol destilado.....	29
9. Diseño del prototipo de destilador solar.....	30
10. Destilador solar.....	32

## 1.INTRODUCCION

Según Moore (1994), del mismo modo que el mundo vivió una transición en términos de energía al pasar del uso de la leña al consumo de carbón en el siglo XIX, y otra por pasar del carbón al petróleo en el siglo XX, todo parece indicar que ya se está gestando una tercera transición en nuestra marcha hacia el futuro.

Según ENCARTA (2008), la destilación es un proceso que consiste en calentar un líquido hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación. El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles. En la evaporación y en el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente menos volátil; el componente más volátil, casi siempre agua, se desecha. Sin embargo, la finalidad principal de la destilación es obtener el componente más volátil en forma pura. Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

Según Rubio (2005), el etanol (alcohol etílico) ha sido tradicionalmente producido a partir de caña de azúcar, cereales de grano, etc. Sin embargo, con el debate sobre los alimentos frente a los combustibles, es muy atractivo usar el sorgo dulce, o productos agrícolas sin alto valor comercial que posean sólidos fermentables. El etanol es una alternativa atractiva para la utilización como combustible ya que es derivado de la biomasa y por tanto es renovable, las más comunes son E10 (etanol al 10%) y E85 (etanol al 85%).

El uso de mezcla de etanol-gasolina normalmente aumenta las emisiones de evaporación y disminuye las emisiones de dióxido de carbono (FAO, 1996).

Lo que se busca con este estudio es desarrollar un prototipo de destilador continuo utilizando la energía solar directa en sustitución a los combustibles fósiles para obtener bioetanol.

Para la realización del estudio fueron utilizados dos diferentes rangos de temperatura ambiente:  $<30^{\circ}\text{C}$  y  $>30^{\circ}\text{C}$ . La cantidad utilizada de vino al 12% de alcohol fue de 105 litros (17.5 litros por tratamiento).

## **1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El desperdicio de mangos en los alrededores del campus de Zamorano es alto, causando problemas tales como: proliferación de moscas, malos olores, mal aspecto, accidentes por deslizamiento, etc. Por otra parte los combustibles fósiles han alcanzados precios extraordinariamente altos.

## **1.2 ANTECEDENTES**

En Zamorano no se han realizado estudios enfocados al desarrollo de prototipos de destiladores que utilicen energía solar en sustitución a los combustibles fósiles para obtener etanol. En otras partes del mundo se ha estudiado el uso de energía solar para calentar y potabilizar agua y para desalinizar agua marina.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

### **1.3.1 Limitantes**

- La cantidad de días soleados fue limitado debido a la época de invierno en que se pudo ejecutar el estudio, lo que impidió realizar los tratamientos con temperaturas ambiente definidas, habiendo tenido que usar rangos térmicos.
- La cantidad de vino de mango con que se contaba para este estudio era baja, lo que impidió la realización de más tratamientos.

### **1.3.2 Alcances**

- Uso exclusivo de energía solar directa sin tener que recurrir a otras formas de energía para compensar horas de nubosidad.
- Desarrollo de un diseño de destilador solar continuo hasta lograr funcionalidad sin ahondar en eficiencia.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Desarrollar un prototipo de destilador continuo utilizando la energía solar directa en sustitución a los combustibles fósiles para obtener bioetanol.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Evaluar diversas alternativas de diseño del aparato para lograr temperaturas del vino suficientes para poder ser destilado (78.6°C).
- Analizar la funcionalidad del diseño del destilador en cuanto a las etapas básicas del proceso: evaporación, condensación y recuperación del destilado.
- Determinar estadísticamente el rango térmico ambiental entre los dos tratamientos que produce una mayor cantidad de bioetanol en el destilado.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 ETANOL

El compuesto químico etanol, o alcohol etílico, es un alcohol que se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78.6°C. Al mezclarse con agua en cualquier proporción, da una mezcla azeotrópica. Su fórmula química es CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-OH, principal producto de las bebidas alcohólicas (Aylward et al., 2006).

Se emplea como combustible industrial y doméstico. En el uso doméstico, se emplea el alcohol de quemar. Éste además contiene compuestos como la piridina o el metanol u otras sustancias denominadas desnaturalizantes, que impiden su uso como alimento, ya que el alcohol para consumo suele llevar impuestos especiales.

En Brasil se añade etanol a la gasolina para bajar la importación de petróleo, dando lugar a laalconafta. Este país es uno de los principales productores (con 18 mil millones de litros anuales), con esto reducen un 40% de sus importaciones de crudo. Esta última aplicación se extiende también cada vez más en otros países para cumplir con el protocolo de Kyoto (LIDEMA, 2007).

Según DOE (United States Department of the energy) (2003), el uso de etanol en automóviles reduce la producción de gases de invernadero en un 85%.

El etanol que proviene de los campos de cosechas (bioetanol) se perfila como un recurso energético potencialmente sostenible que puede ofrecer ventajas ambientales y económicas a largo plazo en contraposición a los combustibles fósiles. Sin embargo, los actuales métodos de producción de bioetanol utilizan una cantidad significativa de energía en comparación al del combustible producido. Por esta razón, no sería recomendable sustituir enteramente el consumo actual de combustibles fósiles por bioetanol (ECOSOFIA, 2006).

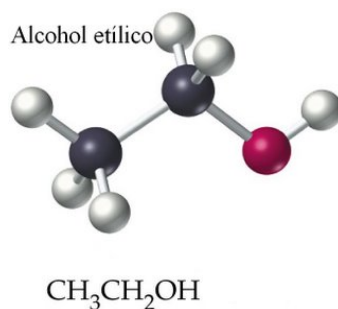


Figura 1. Estructura química del alcohol etílico (etanol).

Fuente: Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, 2008).

## 2.2 EFECTO INVERNADERO

No toda la energía solar que llega a la tierra es aprovechada; una parte es "devuelta" al espacio. Como la tierra es mucho más fría que el sol, no puede devolver la energía en forma de luz y calor. Por eso la envía de una manera diferente, llamada "luz infrarroja".

Los gases de invernadero absorben esta energía infrarroja como una esponja, calentando tanto la superficie de la tierra como el aire que la rodea. Si no existieran los gases de invernadero, el planeta sería cerca de 30°C más frío de lo que es ahora. En esas condiciones, probablemente la vida nunca hubiera podido desarrollarse (Nardini, 2007).

El efecto de calentamiento que producen los gases se llama efecto invernadero; la energía del sol queda atrapada por los gases, del mismo modo en que el calor se queda atrapado detrás del plástico o vidrio del destilador solar.

## 2.3 ENERGÍA SOLAR

El sol es una fuente de energía natural, limpia e inagotable. Cada año el sol vierte sobre la Tierra cuatro veces más energía de la que necesitamos. El ser humano ha aprovechado su energía desde el principio de los tiempos, aunque siempre de forma elemental.

Hoy en día las necesidades energéticas no son las mismas que en épocas anteriores. Es por ello que el hombre moderno intenta aprovechar esta energía de forma más eficiente.

La energía solar tiene, sin embargo, algunas desventajas: de un lado, no es una fuente energética estable, ya que el flujo energético oscila según las estaciones; de otro lado, y de momento, la instalación resulta cara y eso desanima a muchos consumidores (CETAL, 1990).

El sol, en concreto la radiación solar interceptada por la Tierra en su desplazamiento a su alrededor, constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. Nuestro planeta recibe del sol la asombrosa cantidad de energía anual de  $5,4 \times 10^{24}$  J, una cifra que representa 4.5 veces el consumo mundial de energía. Aunque es muy abundante el aprovechamiento de la radiación solar está condicionada por tres aspectos: la intensidad de radiación solar recibida por la Tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada emplazamiento (Ogiran, 1999).

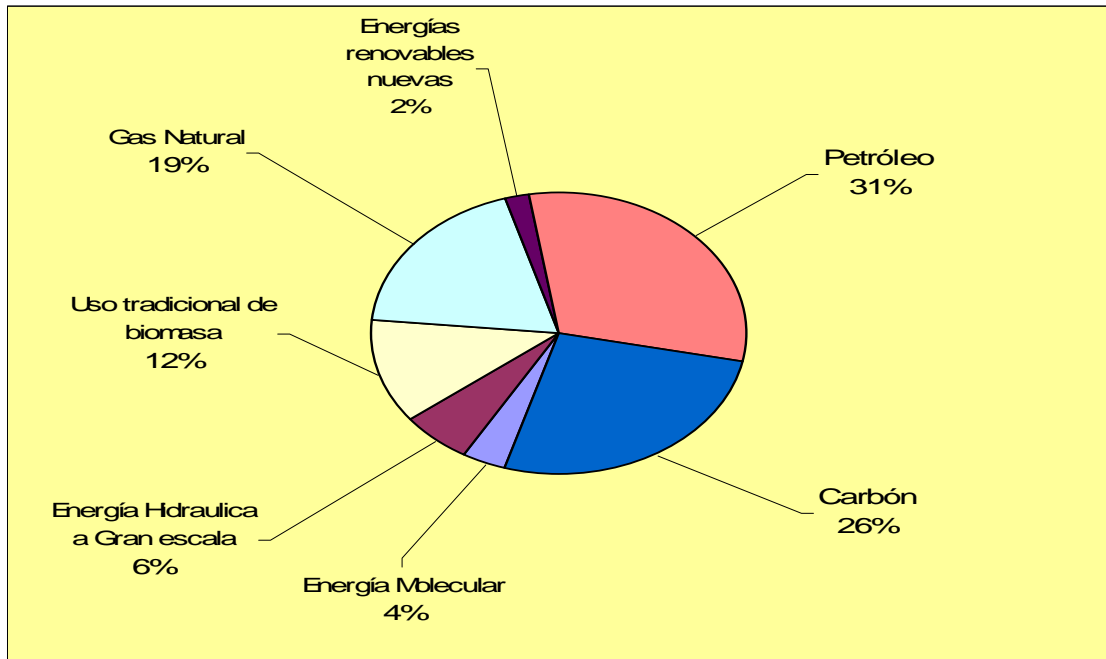


Figura 2. Distribución de fuentes de energía.  
Fuente: (Ogiran, 1999).

## 2.4 DESTILACIÓN

La destilación es un proceso que consiste en calentar un líquido aprovechando los diferentes puntos de ebullición hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor y, a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación.

Según Balaguer (2006), la destilación azeotrópica es una de las técnicas usadas para romper un azeótropo en la destilación. Una de las destilaciones más comunes con un azeótropo es la de la mezcla etanol-agua. Usando técnicas normales de destilación, el etanol sólo puede ser purificado a aproximadamente el 95%.

El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles.

Si los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla sólo difieren ligeramente, no se puede conseguir la separación total en una destilación individual. Un ejemplo importante es la separación de agua, que hierve a 100°C, y alcohol, que hierve a 78.6°C. Si se hierve una mezcla de estos dos líquidos, el vapor que sale es más rico en alcohol y más pobre en agua que el líquido del que procede, pero no es alcohol puro. Con el fin de concentrar una disolución que contenga un 10% de alcohol (como la que puede obtenerse por fermentación) para obtener una disolución que contenga un 50% de alcohol (frecuente en el whisky), el destilado ha de destilarse una o dos veces más, y si se desea alcohol industrial (95%) son necesarias varias destilaciones (Rajiv, Jorapur y Rajvanshi, 1991).

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 UBICACIÓN**

El prototipo del destilador solar y los análisis de laboratorio se realizaron en las instalaciones de la Planta de Procesamiento Hortofrutícola de la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), a 800 msnm con una precipitación promedio anual de 1,100 mm, ubicada en el Valle de Yeguaré, 30 km al este de la ciudad de Tegucigalpa, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, C.A.

### **3.2 MATERIALES UTILIZADOS**

#### **3.2.1 Materiales para la construcción del prototipo de destilador solar**

- Madera.
- Clavos.
- Herramientas de carpintería.
- Plástico de color negro y transparente.
- Pegamento de contacto.
- Alambre.
- Cables de acero y tensadores.
- Balde de 20 litros.
- Manguera de polietileno negro.
- Juego de válvula y accesorios.

#### **3.2.2 Materia prima**

- Vino de mango con 12% de etanol.

#### **3.2.3 Instrumentos y accesorios**

- Alcoholímetro.
- Termómetro.
- Cronómetro.
- Probeta 250 ml.

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 Proceso de destilación de vino de mango

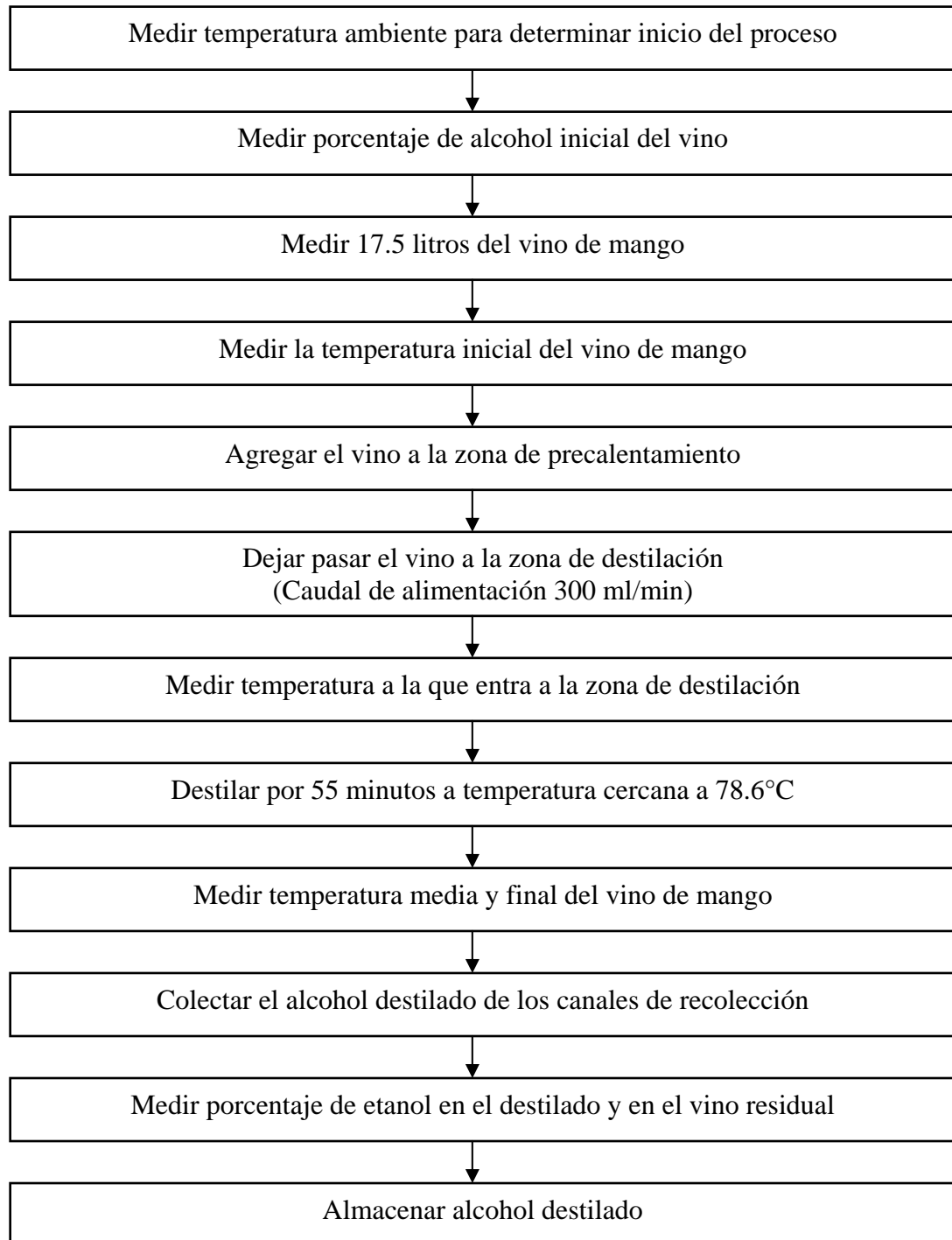


Figura 3. Flujo de proceso de destilación de vino de mango.

### 3.3.2 Desarrollo del prototipo de destilador solar

Para el desarrollo del prototipo de destilador solar, se analizaron las variables de las cuales dependía que se obtenga destilado y fue realizado sin tener como base un modelo físico existente.

La idea inicial incluía un túnel de evaporación, con un techo de plástico que a la vez funcionaría como condensador, a lo largo de cuyos bordes se colectaría el destilado.

### 3.3.3 Pruebas preliminares

Después de varias pruebas preliminares se observó que el vino no alcanzaba la temperatura necesaria para que su alcohol se evaporara, por lo que se decidió incorporar un mecanismo de calentamiento previo al túnel de destilación. Con esta modificación se observó que efectivamente ocurría la evaporación, condensación y recuperación de un destilado alcohólico.

El área de precalentamiento incorporada al diseño básico del destilador consistió en una manguera de polietileno negro de 12 milímetros de diámetro interno, por 30 metros de longitud, arreglada en forma de espiral en una sola capa, colocada adentro de una estructura de madera en forma de bandeja, cuyo fondo estaba recubierto con un plástico negro, y tapada con un plástico transparente, a manera de trampa de calor.

Fueron ingresados a la zona de precalentamiento 17.5 litros de vino de mango al 12% de alcohol, por cada tratamiento, y éste después ingresó al área de evaporación y condensación con un caudal de alimentación de 300 ml/min. Se esperó 55 min por cada tratamiento para poder recolectar el alcohol destilado. Se midieron temperaturas iniciales en la zona de precalentamiento; también, en el área de evaporación y condensación se midió la temperatura inicial, media y final del vino.

La determinación de los 55 min del proceso para colectar el destilado, se basó en la cantidad mínima de destilado que se necesitaba en la probeta para poder usar el alcoholímetro.

Cuadro 1. Tratamientos en la destilación de vino de mango.

Tratamiento	Variable	Rango T°
T1	Temperatura ambiente	< 30°C
T2	Temperatura ambiente	> 30°C

### 3.3.4 Condiciones experimentales del proyecto

El proceso de destilación ejecutado en el prototipo para determinar la efectividad de éste, fue realizado durante la estación de invierno, en el mes de agosto.

El destilador solar tiene una pendiente de 0.01%, una longitud de 10 metros cubierta con plástico de polietileno de color negro, se encuentra cubierto con un techo de

plástico de color transparente, con una separación de los canales a los lados de la madera de aproximadamente 10 cm cada uno.

Al destilador solar se le incorporó un área de precalentamiento que consistió en una manguera de polietileno negro de 12 milímetros de diámetro interno, por 30 metros de longitud, arreglada en forma de espiral en una sola capa, colocada adentro de una estructura de madera en forma de bandeja, cuyo fondo estaba recubierto con un plástico negro, y tapada con un plástico transparente, a manera de trampa de calor. La manguera concluía al inicio del área de destilación donde el vino de mango era vertido a través de una válvula que funcionaba a un caudal constante de 300 ml/min. La destilación se mantuvo durante 55 min para después ser colectado.

Los tratamientos fueron realizados las siguientes fechas cada uno con su respectiva temperatura ambiente:

Cuadro 2. Fechas de realización de los tratamientos.

<b>Realización de los tratamientos</b>		
22/08/2008	T2.1	31.5°C
23/08/2008	T1.3	29.2°C
24/08/2008	T2.3	31.2°C
25/08/2008	T2.2	32.7°C
26/08/2008	T1.2	27.2°C
27/08/2008	T1.1	28.1°C

### 3.3.5 Análisis químicos

Se realizó análisis químico del porcentaje de alcohol a cada uno de los tratamientos en las instalaciones del laboratorio de la Planta Procesadora Hortofrutícola. Los resultados mostrados fueron expresados como el promedio de tres repeticiones.

### 3.3.6 Diseño experimental

La asignación de tratamientos a las unidades experimentales fue completamente al azar, no existió ninguna restricción en la aleatorización.

Cuadro 3. Asignación de tratamientos (DCA).

<b>Aleatorización de los Tratamientos</b>		
T2.1	T2.3	T1.2
T1.3	T2.2	T1.1

### **3.3.7 Análisis estadístico**

Se realizó un DCA (Diseño Completamente al Azar) de 2 tratamientos y 3 repeticiones respectivamente, donde se evaluó la funcionalidad del destilador solar continuo con respecto a la cantidad de alcohol total recuperado. Los resultados obtenidos fueron analizados por el programa “Statistical Analysis System” (SAS<sup>®</sup> versión 9.1) con una separación de medias Tukey con un nivel de significancia de  $P < 0.05$ .

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 4 y 5, se muestran las diferencias en efectividad, entre distintas alternativas para el modelo del destilador solar, siendo mejor, la alternativa que tenía incorporado un mecanismo de calentamiento previo al túnel de destilación, ya que con ésta modificación, el prototipo solar consiguió destilar alcohol del vino de mango.

Cuadro 4. Pruebas con el destilador solar sin área de precalentamiento.

Temperaturas en grados centígrados (°C)					
Tratamiento	Ambiente	Del vino			Alcohol destilado (ml)
		Destilador		Final	
		Entrada	Centro		
Prueba 1	32.80	23.50	40.30	44.00	0.00
Prueba 2	33.40	23.50	38.20	41.40	0.00
Prueba 3	30.30	23.50	35.60	40.80	0.00

Cuadro 5. Pruebas con el destilador solar con área de precalentamiento.

Temperaturas en grados centígrados (°C)						
Tratamiento	Ambiente	Del vino				Alcohol destilado (ml)
		Precalentador		Destilador		
		Entrada	Salida	Centro	Final	
Prueba 1	31.50	23.50	62.50	74.30	57.80	77.40
Prueba 2	32.70	23.50	70.10	76.10	68.50	88.90
Prueba 3	31.20	23.50	62.80	75.80	60.30	80.40

En el Cuadro 6 se muestran las medias de las temperaturas analizadas antes y durante el proceso de destilación, estas fueron temperatura ambiente, temperatura del vino durante almacenamiento, temperatura de entrada del vino al área de evaporación y condensación, temperatura en el centro del área de evaporación y condensación y la temperatura final del vino.

Hubo variaciones de temperatura, debido a la estación (invierno) en que se ejecutó el proyecto, por lo que los datos presentados son medias de tres repeticiones cada una para disminuir la variabilidad entre ellos.

Cuadro 6. Temperaturas analizadas durante el proceso.

Tratamiento	Temperatura en grados centígrados (°C) ± D.E.				
	Ambiente	Del vino			Destilador Final
		Pre calentador Entrada	Salida	Centro	
Tratamiento <30°C	28.10±1.00	23.50±0.00	61.40±2.89	69.10±2.72	56.90±4.70
Tratamiento >30°C	31.80±0.79	23.50±0.00	65.10±4.30	75.40±0.96	62.20±5.60

Se hace notar que las temperaturas que alcanzaron los tratamientos en el centro del área de evaporación y condensación estuvieron entre 69.1°C y 75.4°C, cerca de 78.6°C, que es la temperatura de evaporación del etanol.

En el Cuadro 7 se muestra la cantidad de alcohol total recuperado durante el proceso de destilación solar. También muestra dos factores que estuvieron fijos durante el proceso, estos fueron caudal de alimentación de 300 ml/min, y el tiempo del proceso de destilación del vino que fue de 55 min.

El rango térmico ambiental mayor de 30°C fue el mejor de los dos tratamientos para la destilación solar de acuerdo con los datos recopilados, ya que se obtuvo mayor cantidad de alcohol destilado.

Cuadro 7. Cantidad de alcohol total destilado.

Tratamiento (T)	Caudal (ml/min)	Duración (min)	Condensado recuperado (ml) ± D.E.	Porcentaje de alcohol (%)± D.E.	Alcohol (ml) ± D.E.
Tratamiento <30°C (T1)	300	55	193.76±11.81	17.00±0.03	33.80±7.81
Tratamiento >30°C (T2)	300	55	309.16±12.66	27.00±0.03	82.23±5.97

En el Cuadro 8 se muestra que a medida aumenta la temperatura ambiente, mayor es la cantidad de alcohol destilado que se obtiene, aunque se corre el riesgo de que la temperatura del área de evaporación y condensación sobrepase los 78.6°C, que es la temperatura de ebullición del etanol, y esto causaría que se volatilice mayor cantidad de agua.

Cuadro 8. Relación de temperatura ambiente con la cantidad de alcohol destilado.

Tratamiento	Temperatura ambiente (°C) ± D.E.	Destilado (ml) ± D.E.
Tratamiento <30°C (T1)	28.16±1.00	33.80±7.81
Tratamiento >30°C (T2)	31.80±0.79	82.23±5.96

En el Cuadro 9 se muestra la relación que existe entre la temperatura en el centro del destilador con el porcentaje de alcohol obtenido en el vino, mientras más cerca de 78.6°C es la temperatura en el centro, mayor es el porcentaje de pureza obtenido en el vino.

Cuadro 9. Relación de temperatura en el centro del destilador con el porcentaje de alcohol obtenido en el vino.

<b>Tratamiento (T)</b>	<b>Temperatura en el centro del área de destilación (°C) ± D.E.</b>	<b>Porcentaje alcohol (%)± D.E.</b>
Tratamiento <30°C (T1)	69.17±2.72	17.00±0.03
Tratamiento >30°C (T2)	75.40±0.96	27.00±0.03

En el Cuadro 10 se muestra el porcentaje de alcohol al que sale el vino al final del proceso de destilación. De acuerdo con los datos mostrados, se obtuvo un mayor porcentaje de alcohol destilando los días en que se contaba con temperaturas ambientes mayores a 30°C. De la misma forma se puede observar que los porcentajes de alcohol en el residuo aún son altos, por dicha razón se podría considerar el reproceso del vino residual.

Cuadro 10. Porcentaje de alcohol en el vino final (residuo).

<b>Tratamiento (T)</b>	<b>Porcentaje de alcohol en el vino de entrada (%)± D.E.</b>	<b>Porcentaje de alcohol destilado (%)± D.E.</b>	<b>Porcentaje de alcohol en el vino residual (%)± D.E.</b>
Tratamiento <30°C (T1)	12.00±0.00	17.00±0.03	7.00±0.01
Tratamiento >30°C (T2)	12.00±0.00	27.00±0.06	6.00±0.01

## 4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Según los datos mostrados en el Cuadro 11, se puede observar que si se encontró diferencia estadística entre ambos tratamientos, siendo el mejor de los dos analizados, el tratamiento que tenía como variable el rango térmico ambiental mayor a 30°C; presentando mayor efectividad con respecto a la cantidad de alcohol total destilado.

Cuadro 11. Efectividad del destilador solar continuo.\*

<b>Tratamiento</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Alcohol destilado (ml)</b>
Temperatura ambiente >30°C	3	82.00 <sup>a</sup>
Temperatura ambiente <30°C	3	33.80 <sup>b</sup>

\*Medias con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05).

En el Cuadro 12 se puede observar que si existió diferencia entre ambos tratamientos con respecto al porcentaje de alcohol obtenido en el destilado, ya que a mayor temperatura ambiental, se consiguió un destilado con mayor concentración alcohólica.

Cuadro 12. Porcentaje de pureza del alcohol (%).\*

Tratamiento	Número de observaciones	Porcentaje de alcohol destilado
Temperatura ambiente >30°C	3	26.67 <sup>a</sup>
Temperatura ambiente <30°C	3	17.33 <sup>b</sup>

\*Medias con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05).

En el Cuadro 13 se puede observar que los tratamientos son estadísticamente iguales, ya que el porcentaje de alcohol obtenido en el residuo del tratamiento que utilizó temperatura térmica ambiental mayor a 30°C no es significativamente diferente al que utilizó temperatura ambiental menor a 30°C.

Cuadro 13. Porcentaje de alcohol residual en el vino de mango (%).\*

Tratamiento	Número de observaciones	Porcentaje de alcohol residual
Temperatura ambiente >30°C	3	6.00 <sup>a</sup>
Temperatura ambiente <30°C	3	7.33 <sup>a</sup>

\*Medias con igual letra son significativamente iguales (P>0.05).

Según los datos mostrados en el Cuadro 14 se puede observar que si existió diferencia significativa entre ambos tratamientos, y que la temperatura ambiente efectiva entre los dos tratamientos analizados fue en promedio de 31.8°C.

Cuadro 14. Temperatura ambiente efectiva (°C).\*

Tratamiento	Número de observaciones	Temperatura ambiente
Temperatura ambiente >30°C	3	31.80 <sup>a</sup>
Temperatura ambiente <30°C	3	28.17 <sup>b</sup>

\*Medias con diferente letra son significativamente diferentes (P<0.05).

En el Cuadro 15 se puede observar una correlación alta positiva, de 0.98, existente entre la temperatura ambiente y la cantidad de alcohol destilado.

Cuadro 15. Correlación de temperatura ambiente y alcohol destilado (ml).\*

<b>Correlación</b>	<b>Alcohol destilado (ml)</b>
<b>Temperatura ambiente</b>	0.98

\*(P= 0.0004).

Según los datos obtenidos en el Cuadro 16 se puede observar que la correlación obtenida entre temperatura ambiente y porcentaje de alcohol fue alta positiva con un valor de 0.99 lo que nos indica que a mayor temperatura ambiente, mayor es el porcentaje de alcohol obtenido en el destilado.

Cuadro 16. Correlación de temperatura ambiente y porcentaje de alcohol destilado.\*

<b>Correlación</b>	<b>Porcentaje de Alcohol destilado</b>
<b>Temperatura ambiente</b>	0.99

\*(P= 0.0001).

En el Cuadro 17 se muestra que la correlación entre temperatura ambiente y el porcentaje existente en el vino residual fue alta negativa con un valor de -0.83. Esto nos indica que a mayor temperatura térmica ambiental, menor es el porcentaje de alcohol existente en el vino residual.

Cuadro 17. Correlación de temperatura central y porcentaje de alcohol residual.\*

<b>Correlación</b>	<b>Porcentaje de alcohol residual</b>
<b>Temperatura ambiente</b>	- 0.83

\*(P= 0.0427)

Según los datos obtenidos en el Cuadro 18 se puede observar que la correlación existente entre temperatura ambiente y el porcentaje de alcohol destilado fue alta positiva, ya que el valor obtenido fue de 0.96. Esto nos indica que a mayor es la temperatura térmica ambiental, mayor es el porcentaje de alcohol a obtener en el destilado.

Cuadro 18. Correlación de temperatura central y porcentaje de alcohol destilado.\*

<b>Correlación</b>	<b>Porcentaje de alcohol destilado (%)</b>
Temperatura ambiente	0.96

\*(P= 0.0022)

## 5. CONCLUSIONES

- De las diversas alternativas ensayadas en cuanto al diseño del aparato, se encontró que la que incluía un área de precalentamiento fue la que logró una temperatura del vino adecuada para el proceso de destilación.
- El diseño final del destilador solar construido fue capaz de evaporar el etanol contenido en el vino, condensarlo, y colectarlo; aunque el remanente del vino después del proceso aún contenía hasta 8% de etanol.
- Existe diferencia significativa entre las variables analizadas (rangos de temperatura ambiente), el mejor tratamiento fue el de alta temperatura ambiente, que produjo una mayor temperatura en el centro del túnel de evaporación con un promedio de 75.4°C, ya que favoreció al proceso de destilación, y se obtuvo mayor cantidad de alcohol destilado.

## 6. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio utilizando diferentes caudales para analizar el efecto que tiene éste unido a diferentes temperaturas.
- Realizar más repeticiones para disminuir el error que se pueda dar.
- Realizar el proyecto en época de verano, para no tener cambios bruscos de temperaturas que puedan afectar los resultados.
- Evaluar más variables durante el proceso como: caudal, pendiente, tiempo de calentamiento, materiales del prototipo.
- Realizar análisis de cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) para saber que tipos de alcoholes son los que se está destilando.
- Instalar alguna forma de aspersión de agua sobre el túnel para agilizar la condensación.
- Buscar algún tipo de alternativa con respecto al plástico transparente, para evitar fuga de gases (alcohol). Si se sigue usando plástico polietileno, usar del plástico tratado para resistir luz ultravioleta, y así aumentar la vida útil de éste.
- En la sección de precalentamiento usar tubería de cobre en vez de polietileno, para mejorar la conductividad térmica.

## **7. RECONOCIMIENTOS**

- A Dios por sus bendiciones y por darme mucho apoyo a lo largo del camino.
- A mis padres por su apoyo incondicional para la realización de mis estudios, por la total confianza depositada en mí, por sus consejos y sobre todo su amor. Muchas gracias, los quiero mucho.
- A Juan Xavier, mi novio, por ser un gran apoyo en todo momento, por el amor y paciencia que me ha brindado siempre. Su ayuda fue importante para la realización del proyecto.
- A mi asesor de tesis el Ing. Rodolfo Cojulún, por su experiencia brindada, por su confianza, paciencia y amistad incondicional. También al Dr. Luis Fernando Osorio por sus conocimientos y experiencia brindada a lo largo del proyecto.
- A mi gran amiga Jennifer por su apoyo, sus consejos, la paciencia brindada pero sobre todo su cariño y amistad incondicional.
- A todo el personal de la Planta de Procesamiento Hortofrutícola, por su ayuda en la elaboración de mi tesis. Sobre todo a Milton y a Magdalena.
- A todas mis amigas cercanas de Zamorano, por brindarme su amistad.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Aylward, A; Findlay, D; Wiley, M. 2006. SI Chemical kenalf Data Book. 4<sup>th</sup>. Edición. Cetal. 122 p.

Balaguer, M. 2006. Revista de la Consejería de Educación del Reino Unido e Irlanda (en línea). Consultado el 10 de septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.mepsyd.es/exterio/uk/es/tecla/nuevasteclas/tecla2006/B-12-05-06.pdf>

CETAL (Centro de Estudios en Tecnologías Apropriadas para América Latina). 1990. 2ª. Edición. CETAL ediciones. 80 p.

ECOSOFIA. 2006. Energías alternativas: el etanol (en línea). Consultado el 7 de septiembre de 2008. Disponible en: [http://ecosofia.org/2006/05/etanol\\_energía.html](http://ecosofia.org/2006/05/etanol_energía.html)

Enciclopedia ENCARTA 2008. Diferentes tipos de destilación de laboratorio (en línea). Consultado el 7 de septiembre de 2008. Disponible en: [http://es.encarta.msn.com/encyclopedia\\_761571938/Destilaci%C3%B3n.html](http://es.encarta.msn.com/encyclopedia_761571938/Destilaci%C3%B3n.html)

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1996. Biomass Energy Profiles. Primera edición. Roma, Italy. Bulletin n° 54, 132 p.

IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). 2008. Estructura química del alcohol etílico (en línea). Consultada el 11 de septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.iupac.org/objID/article/pac8002x0201>

Rajiv, M; Jorapur, L; Rajvanshi, A. 1991. Alcohol distillation by solar energy (en línea). Consultado el 3 de septiembre de 2008. Disponible en: <http://nariphaltan.virtualave.net/ethanoldist.pdf>

LIDEMA (Liga de Defensa del Medio Ambiente). 2007. Etanol (en línea). Consultado el 15 de septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.lidema.org.bo/2etanol.pdf>

Moore, C. 1994. Documento Verde, Energía: Una Nueva Era. Boletín 3. Primera edición. Servicio Cultural e Informativo de Los Estados Unidos de América. 11 p.

Nardini, A. 2007. Calentamiento global (en línea). Consultado el 3 de septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.blogextremo.com/savingourearth/>

Ogiran, R. 1999. La Energía Solar (en línea). Consultado 3 de Septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.geocities.com/regorogiram/solar.html>

Ogiran, R. 1999. Distribución de fuentes de energía (en línea). Consultado 3 de Septiembre de 2008. Disponible en: <http://www.geocities.com/regorogiram/intro.html>

Rubio, G. 2005. Los biocombustibles: situación actual, análisis y perspectivas de la producción en MERCOSUR y del comercio con la Unión Europea (en línea). Consultado el 10 de septiembre de 2008. Disponible en: [http://www.fao.org/sd/dim\\_en2/docs/working1\\_es.doc](http://www.fao.org/sd/dim_en2/docs/working1_es.doc)

United States Department of the energy. 2003. Solar alternatives energy (en línea). Consultado el 13 de septiembre de 2008. Disponible en: [http://www.energy.gov/alternative\\_energy.html](http://www.energy.gov/alternative_energy.html)

## **9. ANEXOS**

## Anexo 1. Cuadro del SAS para cantidad de alcohol destilado (ml).

		Sistema SAS		21:25 Tuesday, September 16, 2008	
Procedimiento GLM					
Variable dependiente: ALCOHOLDEST					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	3484.860000	3484.860000	75.72	0.0010
Error	4	184.080000	46.020000		
Total correcto	5	3668.940000			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	ALCOHOLDEST Media	
	0.949827	11.71641	6.783804	57.90000	
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRT	1	3484.860000	3484.860000	75.72	0.0010

		Sistema SAS		21:25 Tuesday, September 16, 2008	
Procedimiento GLM					
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para ALCOHOLDEST					
NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.					
	Alfa			0.05	
	Error de grados de libertad			4	
	Error de cuadrado medio			46.02	
	Valor crítico del rango estudentizado			3.92649	
	Diferencia significativa mínima			15.379	
Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.					
Tukey Agrupamiento	Media	Número de observaciones	TRT		
A	82.000	3	T2		
B	33.800	3	T1		

## Anexo 2. Cuadro del SAS para porcentaje de alcohol (pureza).

Procedimiento GLM					
Variable dependiente: porcentajealcohol					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	130.6666667	130.6666667	14.79	0.0184
Error	4	35.3333333	8.8333333		
Total correcto	5	166.0000000			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	porcentajealcohol Media	
	0.787149	13.50951	2.972092	22.00000	
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRT	1	130.6666667	130.6666667	14.79	0.0184

Procedimiento GLM	
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para porcentajealcohol	
NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.	
Alfa	0.05
Error de grados de libertad	4
Error de cuadrado medio	8.833333
Valor crítico del rango estudentizado	3.92649
Diferencia significativa mínima	6.7376
Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.	
Tukey Agrupamiento	Media N TRT
A	26.667 3 T2
B	17.333 3 T1

## Anexo 3. Cuadro del SAS para porcentaje de alcohol residual en el vino.

Procedimiento GLM					
Variable dependiente: alcoholresidual					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	2.66666667	2.66666667	2.29	0.2051
Error	4	4.66666667	1.16666667		
Total correcto	5	7.33333333			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	alcoholresidual Media	
	0.363636	16.20185	1.080123	6.666667	
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRT	1	2.66666667	2.66666667	2.29	0.2051

Procedimiento GLM			
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para alcoholresidual			
NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.			
Alfa			0.05
Error de grados de libertad			4
Error de cuadrado medio			1.166667
Valor crítico del rango estudentizado			3.92649
Diferencia significativa mínima			2.4486
Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRT
A	7.3333	3	T1
A	6.0000	3	T2

## Anexo 4. Cuadro del SAS para temperatura ambiente.

Procedimiento GLM					
Variable dependiente: tempambiente					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	19.80166667	19.80166667	24.25	0.0079
Error	4	3.26666667	0.81666667		
Total correcto	5	23.06833333			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	tempambiente Media	
	0.858392	3.013995	0.903696	29.98333	
Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRT	1	19.80166667	19.80166667	24.25	0.0079

Procedimiento GLM	
Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para tempambiente	
NOTA: Este test controla el índice de error experimentwise de tipo I, pero normalmente tiene un índice de error de tipo II más elevado que REGWQ.	
Alfa	0.05
Error de grados de libertad	4
Error de cuadrado medio	0.816667
Valor crítico del rango estudentizado	3.92649
Diferencia significativa mínima	2.0486
Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.	
Tukey Agrupamiento	Media N TRT
A	31.8000 3 T2
B	28.1667 3 T1

Anexo 5. Cuadro del SAS para correlación de temperatura ambiente y alcohol destilado (ml).

Procedimiento CORR						
2 Variables: ambiente mlalcohol						
Estadísticos simples						
Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
ambiente	6	29.98333	2.14794	179.90000	27.20000	32.70000
mlalcohol	6	58.01667	27.24617	348.10000	25.80000	88.90000
Coeficientes de correlación Pearson, N = 6 Prob >  r  suponiendo H0: Rho=0						
		ambiente	mlalcohol			
	ambiente	1.00000	0.98447 0.0004			
	mlalcohol	0.98447 0.0004	1.00000			

Anexo 6. Cuadro del SAS para correlación de temperatura ambiente y pureza del alcohol destilado (%).

Procedimiento CORR						
2 Variables: ambiente porcentajealcohol						
Estadísticos simples						
Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
ambiente	6	29.98333	2.14794	179.90000	27.20000	32.70000
porcentajealcohol	6	22.00000	5.76194	132.00000	14.00000	30.00000
Coeficientes de correlación Pearson, N = 6 Prob >  r  suponiendo H0: Rho=0						
		ambiente	porcentajealcohol			
	ambiente	1.00000	0.99060 0.0001			
	porcentajealcohol	0.99060 0.0001	1.00000			

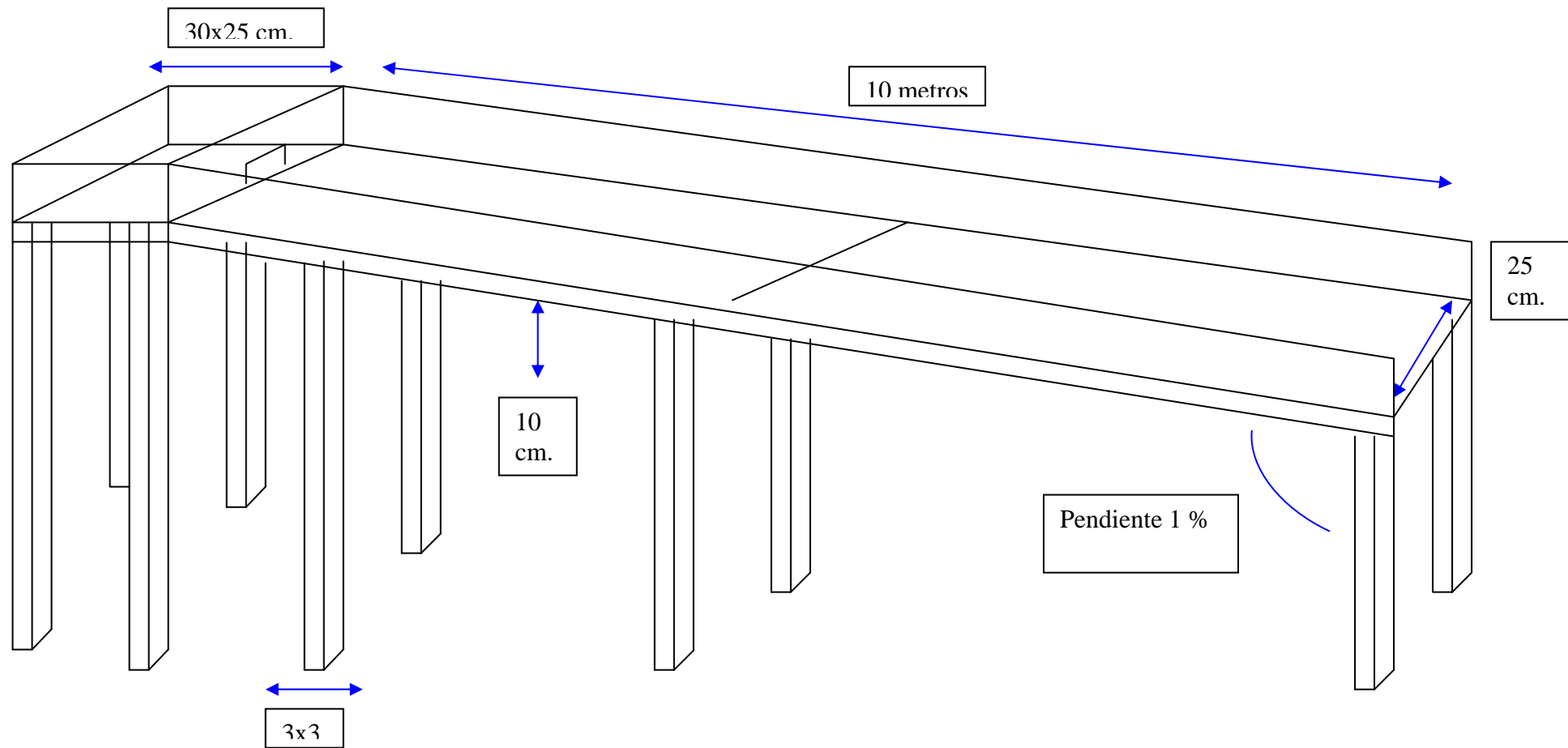
Anexo 7. Cuadro del SAS para correlación de temperatura en el centro del destilador y el alcohol residual en el vino.

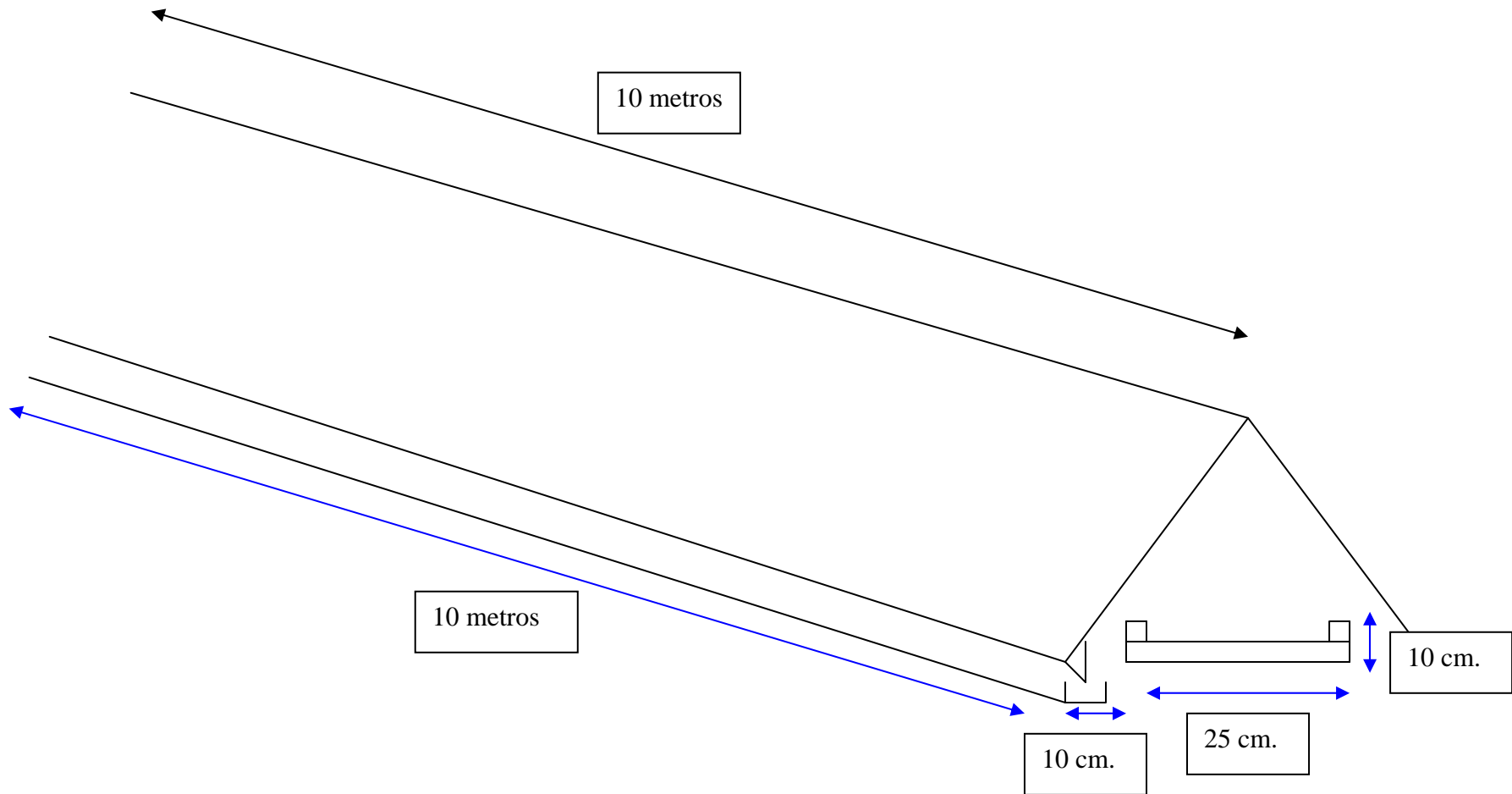
Procedimiento CORR						
2 Variables: tcentro alcoholresidual						
Estadísticos simples						
Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
tcentro	6	72.28333	3.87217	433.70000	66.10000	76.10000
alcoholresidual	6	6.50000	1.37840	39.00000	5.00000	8.00000
Coeficientes de correlación Pearson, N = 6 Prob >  r  suponiendo H0: Rho=0						
		tcentro	alcoholresidual			
tcentro		1.00000	-0.82624 0.0427			
alcoholresidual		-0.82624 0.0427	1.00000			

Anexo 8. Cuadro del SAS para correlación de temperatura en el centro del destilador y la pureza del alcohol destilado.

Procedimiento CORR						
2 Variables: tcentro porcentajealcohol						
Estadísticos simples						
Variable	N	Media	Desviación típica	Suma	Mínimo	Máximo
tcentro	6	72.28333	3.87217	433.70000	66.10000	76.10000
porcentajealcohol	6	22.00000	5.76194	132.00000	14.00000	30.00000
Coeficientes de correlación Pearson, N = 6 Prob >  r  suponiendo H0: Rho=0						
		tcentro	porcentajealcohol			
tcentro		1.00000	0.96185 0.0022			
porcentajealcohol		0.96185 0.0022	1.00000			

## Anexo 9. Diseño del prototipo de destilador solar.





Anexo 10. Destilador solar.

