



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS**

**MAESTRÍA EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN ENERGÉTICA**

**TITULO:**

**EVALUACION DE UN SECADOR SOLAR INCLINADO CON  
ABSORBEDOR DE ZEOLITA PARA GRANOS DE CACAO CCN51**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE**

**MAGISTER EN PLANIFICACION Y GESTION ENERGETICA**

**AUTOR:** Jorge Marcelo Siguencia Ávila Ingeniero Químico

**DIRECTOR:** Eliana Coello Pons Mst.

**CUENCA, ECUADOR**

**2013**



## RESUMEN

El secado del cacao, parte importante en el proceso de comercialización continúa siendo una desventaja para pequeños productores que han tenido que someterse al precio especulativo del grano por parte de intermediarios, debido a la dificultad de poseer un sistema controlado para el secado que a veces resulta costoso. En este estudio se da una alternativa al proceso aplicando energía renovable a través de secadores solares inclinados a base de zeolitas, el objetivo fundamental es evaluar un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección natural para granos de cacao CCN51

Para lo cual, se establecieron escenarios comparativos con el secado tradicional en tendal, en donde se trabajó con distinta inclinación del secador solar (5 % y 15%) además se realizó una evaluación de la zeolita con presencia y ausencia de ésta en un experimento adicional para observar la incidencia dentro del proceso, los datos recogidos básicamente fueron tiempos de secado (críticos y totales) en todos los casos; afectados por variables como temperatura, humedad relativa, radiación solar, etc. Los resultados obtenidos fueron tratados analítica y estadísticamente utilizando principios de secado y el modelo matemático factorial  $2^k$  respectivamente. De donde el secador propuesto con una inclinación del 5% y con absorbedor de zeolita resultó ser más eficiente que los demás, tanto en la reducción de los tiempos de secado como en el análisis factorial, además de ser viable económicamente, por lo que implementar este tipo de secador solar es factible para utilizarse en el proceso de secado de cacao por parte de pequeños y medianos productores.



## ABSTRACT

Drying cocoa important part in the marketing process continues to be a disadvantage for small farmers who have had to undergo the grain price speculation by intermediaries, due to the difficulty of possessing a controlled system for drying which is sometimes costly. This study provides an alternative to the process using renewable energy through solar dryers zeolites inclined to base, the main objective is to evaluate a solar dryer absorber zeolite inclined natural convection CCN51 cocoa beans For which, comparative scenarios were established with traditional drying clothes line, where they worked with different inclination of the solar dryer (5% and 15%) plus an evaluation of the zeolite with the presence and absence of this in an additional experiment to observe the incidence in the process, the data collected were basically drying times (critical and total) in all cases affected by variables such as temperature, relative humidity, solar radiation, etc.. The results were statistically treated using analytical and drying principles and mathematical model factorial 2k respectively. Where the proposed dryer with a gradient of 5%, and zeolite absorber proved more efficient than others, both in reducing the drying time in the factor analysis as well as being economically feasible, so that implementing this type solar dryer is feasible for use in the drying process cocoa by small and medium producers.



## Contenido

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCION .....  | 7  |
| CAPITULO I .....  | 10 |
| SECADO DE GRANOS.....   | 10 |
| 1.1 Introducción .....  | 10 |
| 1.2 Secado de granos en la agroindustria.....   | 12 |
| 1.2.1 Liofilización o Secado por Congelación .....  | 13 |
| 1.2.2 Secado por tambores o Secado por rodillos .....   | 13 |
| 1.2.3 Congelación Rápida Individual (IQF, por sus siglas en inglés – Individual Quick Frozen) ..... | 14 |
| 1.2.4 Baja Humedad o Infusión de Frutos con Solutos de Azúcar .....                                 | 14 |
| 1.3 Secado de granos en el Ecuador .....  | 15 |
| 1.4 Parámetros a considerar en el secado de granos .....  | 16 |
| 1.4.1 Humedad .....   | 17 |
| 1.4.2 Equilibrio en el contenido de humedad.....  | 18 |
| 1.4.3 Contenido crítico de humedad.....   | 18 |
| 1.4.4 Temperatura.....  | 18 |
| 1.4.5 Curva de secado .....   | 19 |
| 1.4.6 Tiempo de secado.....   | 22 |
| 1.4.7 Período de caída de secado.....   | 23 |
| 1.5 Secado del grano de cacao en Ecuador .....  | 25 |
| 1.6 Importancia del secado de grano de cacao en Ecuador.....  | 26 |
| 1.7 Conclusiones capítulo I.....  | 27 |
| CAPITULO II .....   | 28 |
| SECADO DEL GRANO DE CACAO.....  | 28 |
| 2.1 Introducción .....  | 28 |
| 2.2 Demanda mundial del cacao.....  | 29 |
| 2.2.1 Demanda del cacao ecuatoriano .....   | 30 |
| 2.3 Producción de cacao en el Ecuador.....  | 31 |
| 2.3.1 El cacao y sus variedades .....   | 34 |
| 2.3.2 Etapas en el cultivo y tratamiento del cacao.....   | 37 |



|   |    |
|---|----|
| 2.3.2 La Poda del cacao.....  | 37 |
| 2.3.3 Fertilización .....   | 39 |
| 2.3.4 Cosecha.....  | 41 |
| 2.3.5 Fermentación .....  | 42 |
| 2.3.6 Secado.....   | 45 |
| 2.4 Parámetros a considerar en el grano secado de cacao .....   | 46 |
| 2.5 Secadores de granos de cacao .....  | 47 |
| 2.5.1 Secado Artificial con GLP .....   | 48 |
| 2.5.1 Secado Natural .....  | 49 |
| 2.5.1.1 Secado natural en tendales.....   | 49 |
| 2.5.1.2 Tendal económico – INIAP .....  | 50 |
| 2.5.1.3 Tendal rodante .....  | 50 |
| 2.5.3 Secadores solares inclinados de granos de cacao.....  | 51 |
| 2.5.4 La zeolita.....   | 52 |
| 2.5.4.1 Usos de la zeolita en energía solar.....  | 57 |
| 2.5.4.2 Secadores solares sin absorbedor de zeolita .....   | 57 |
| 2.5.4.3 Secadores con absorbedor de zeolita .....   | 59 |
| 2.5.5 Importancia del secador solar con absorbedor de zeolita .....   | 60 |
| 2.6 Conclusiones del capítulo .....   | 60 |
| CAPITULO III .....  | 61 |
| PROYECTO DE UN SECADOR SOLAR INCLINADO CON ABSORBEDOR DE ZEOLITA<br>POR CONVECCIÓN NATURAL PARA GRANOS DE CACAO .....     | 61 |
| 3.1 Introducción .....  | 61 |
| 3.2 Secadores por convección natural y forzada .....  | 62 |
| 3.3 Secadores solares de granos de cacao por convección natural.....  | 64 |
| 3.4 Proyecto de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección<br>natural para granos de cacao ..... | 66 |
| 3.4.1 Isoterma de sorción.....  | 67 |
| 3.5.1 Diseño del Secador .....  | 69 |
| 3.4.2.1 General .....   | 69 |
| 3.4.2.2 Detalles Constructivos.....   | 71 |
| 3.4.2.2.1 Policarbonato .....   | 71 |
| 3.4.2.2.2 Placa de Madera .....   | 73 |
| 3.4.2.2.3 Estructura.....   | 74 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.5 Conclusiones del capítulo .....  | 75  |
| CAPITULO IV.....   | 77  |
| EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR INCLINADO CON ABSORBEDOR DE ZEOLITA<br>POR CONVECCIÓN NATURAL PARA GRANOS DE CACAO .....                      | 77  |
| 4.1 Introducción .....   | 77  |
| 4.2 Evaluación del secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección<br>natural para granos de cacao CCN-51.....              | 78  |
| 4.2.1 Ubicación del área de estudio .....  | 78  |
| 4.2.2 Condiciones climatológicas del área de estudio .....   | 79  |
| 4.2.2.1 Variación de la intensidad de la radiación solar .....   | 87  |
| 4.2.3 Equipo utilizado .....   | 89  |
| 4.2.4 Proceso del experimento.....   | 94  |
| 4.2.5 Diseño estadístico de experimentos .....   | 106 |
| 4.2.3 Resultados del experimento .....   | 113 |
| 4.2.4Análisis de los resultados experimentales .....   | 152 |
| 4.3 Guía para implementar un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por<br>convección natural para el grano de cacao CCN-51 ..... | 156 |
| 4.4 Conclusiones del capítulo .....  | 158 |
| CAPITULO V.....  | 159 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 159 |
| BIBLIOGRAFIA .....   | 164 |
| Índice de Figuras.....   | 168 |
| Índice de Tablas.....  | 172 |
| Significados y símbolos.....   | 174 |
| Anexos: .....  | 177 |
| Anexo 1: Características del GPS Garmin 550 .....  | 177 |
| Anexo 2: Especificaciones del anemómetro DKI TYP.....  | 178 |
| Anexo 3: Especificaciones del Termohigrómetro Radioshack A210.....   | 179 |
| Anexo 4: Experiencia preliminar de secado realizado en Cuenca el 9 de Noviembre de 2012<br>.....   | 180 |
| Anexo 5: Radiación solar software GEOSOL V 2.0 .....   | 182 |
| Anexo 6: Archivo fotográfico .....   | 184 |



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Jorge Marcelo Siguencia Avila, autor de la tesis "Evaluación de un secador solar con absorbidor de zedilla para granos de cacao GCN51", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autoría.

Cuenca, 18 de julio de 2013



Jorge Siguencia Avila  
0901537837



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Jorge Marcelo Siguencia Avila, autor de la tesis "Evaluación de un secador solar con absorbedor de zeolita para granos de cacao GCN51", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, si ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en gestión y planificación energética. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará atención alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 18 de julio de 2013



Jorge Siguencia Avila.  
0304837837

Quena Patrimonio Cultural de la Humanidad - Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405-1000, Edo.: 1211, 1212, 1215 e-mail  
oajbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103 Cuenca - Ecuador





## INTRODUCCION

La producción de cacao en la región costa del país se ha incrementado en estos últimos años, debido a la demanda de los mercados internacionales, esto ha generado beneficios para la economía ecuatoriana, por el aumento de exportaciones y por ende un aumento del PIB, pero también ha traído inconvenientes debido a que el producto ha sido manejado empíricamente a fin de obtener mayor ingreso por parte de los productores, como es el caso del secado del cacao, el cual se ha generalizado debido a que el precio del cacao deshidratado representa un valor real frente al precio especulativo del cacao fresco impuesto por el intermediario. Para ello el combustible utilizado ha sido gas licuado de petróleo, que a más de ser un recurso costoso es destinado principalmente al uso doméstico.

El Ecuador no contó, hasta finales del año 2007, con lineamientos claros respecto a un Plan Nacional de Eficiencia Energética, debido a la falta de información y capacitación técnica, la cual ha limitado las posibilidades de identificar oportunidades y proponer soluciones concretas y factibles para mejorar el uso final de la energía<sup>1</sup>

El problema no ha sido resuelto en este ámbito, en donde a más de no justificarse el uso de gas licuado de petróleo para este proceso, tienen acceso a él aquellos productores que manejan mayores ingresos económicos, dejando a los pequeños y medianos productores con el mayor sacrificio y menor remuneración durante esta cadena productiva.

Por esta razón, este estudio da una alternativa al proceso de secado aplicado al cacao, a través de secadores solares inclinados a base de zeolitas, que son ecológicos y además no utilizan ningún tipo de combustible fósil, que hasta la actualidad se han usado por desconocimiento de los productores.

---

<sup>1</sup> Plan Maestro de Electrificación del Ecuador 2012-2021, CONELEC



Finalmente en base al secado solar, este estudio compara el modelo propuesto, frente al secado artesanal en tendales, que los pequeños productores realizan para deshidratar el producto en días soleados, mostrando la eficiencia de estos tipos de secado y dando una alternativa para adaptarla al proceso real de secado de cacao.

## **CAPITULO I**

### **SECADO DE GRANOS**

#### **1.1 Introducción**

El secado solar de granos es una de las aplicaciones más importantes de la energía solar, solo se requiere calor a bajos niveles de temperatura, donde la eficiencia de los colectores es mayor, y además, no es indispensable la acumulación de energía.

El secado solar natural en patios es la forma más antigua y difundida del empleo de la energía solar para el secado de productos agropecuarios. El secado natural en los patios ha ido disminuyendo progresivamente a favor del secado artificial que utiliza energía convencional, dado fundamentalmente por la disminución del tiempo de secado, lo que conlleva a eliminar la posibilidad de daño al producto por secado lento y la disminución del costo de la mano de obra.

Al utilizar secadores que emplean energía convencional se consume mayor cantidad de ésta, y debe hacerse una inversión inicial generalmente alta, por lo tanto, cuando el proceso se efectúa en secadores que utilizan energía convencional puede suceder que el costo sea alto.

El precio de los combustibles en los últimos años, ha incrementado el interés en el aprovechamiento de la energía solar para el secado de productos agropecuarios, y



numerosos países entre los que se pueden citar Brasil, Argentina, Perú, etc, trabajan en este sentido.<sup>2</sup>

Por otra parte, se conoce que la productividad de un secador solar es inferior a la de un secador que utilice energía convencional, por lo tanto, para ser competitivo con este último, los costos iniciales y de operación deben ser menores, manteniendo una calidad en el producto comparable a la de un secador térmico convencional.

En el proceso de beneficio de diferentes productos agrícolas se realiza, como paso imprescindible, el secado de semillas, el que se efectúa en secadores térmicos convencionales, constituyendo esta operación uno de los renglones de mayor consumo energético y con un peso apreciable dentro de los costos del proceso.

La producción de semillas es una actividad intrínsecamente rentable y considerada estratégica para muchos países subdesarrollados. En nuestro país es también una de las líneas priorizadas en el contexto de la investigación científica por su incidencia fundamental en la alimentación humana.

El secado de semillas puede realizarse en condiciones fácilmente alcanzables mediante el secado solar. Para intentar dar solución a algunos de estos problemas, la aplicación de la tecnología solar debe pasar por las obligadas etapas de los estudios cinéticos para el secado de semillas en el prototipo por considerar, y del estudio económico del comportamiento del proceso de secado solar frente a las variantes convencionales en igualdad de condiciones y en condiciones nominales de funcionamiento.

La premisa conceptual en el diseño del secador solar de granos es el abaratamiento de su costo y la sencillez de su operación, que deben ser factores a tomar en cuenta para elaborar tecnologías solares en el secado de semillas. Las variables del

---

<sup>2</sup> Bergues, c. *et al.*(1993). Estudio de la cinética del secado de granos en el prototipo de secador solar. análisis de los resultados., Revista tecnología química.



comportamiento cinético del secado son de interés para determinar los índices funcionales del secador.

## 1.2 Secado de granos en la agroindustria

La agroindustria, una actividad económica que comprende la producción, industrialización y comercialización de productos agrarios pecuarios, forestales y biológicos se divide en dos categorías, alimentaria y no alimentaria. La primera se encarga de la transformación de los productos de la agricultura, ganadería, riqueza forestal y pesca, en productos de elaboración para el consumo alimenticio, en esta transformación se incluye los procesos de selección de calidad, clasificación (por tamaño), embalaje-empaque y almacenamiento de la producción agrícola, a pesar que no haya transformación en sí y también los cambios posteriores de los productos y subproductos obtenidos de la primera transformación de la materia prima agrícola.

La rama no-alimentaria es la encargada de la parte de transformación de estos productos que sirven como materias primas, utilizando sus recursos naturales para realizar diferentes productos industriales.

Dentro de los procesos agroindustriales en general destacamos dos:

- a. Procesos que no sufren transformación
- b. Procesos que sufren transformación

Dentro del primer grupo encontramos principalmente operaciones, las cuales forman parte de la primera etapa del proceso como son, centros de acopio, almacenamiento, transporte, selección etc.

Mientras tanto los procesos en los cuales el producto sufre transformación, generalmente forman parte de una segunda etapa dentro del proceso del producto como son, conservación y elaboración.

Dentro de la segunda etapa, nos detendremos en procesos de conservación utilizados en la industria como es el secado de granos.



El secado es el proceso más antiguo utilizado para la preservación de alimentos, siendo uno de los métodos más comunes de mayor importancia en todos los sectores para la producción de alimentos sólidos.

El secado de alimentos es un proceso de remoción de humedad. Su objetivo consiste en mejorar la estabilidad de un producto al estar éste almacenado, con un mínimo de requerimientos de empaque y reduciendo los pesos para su transportación. Entre los métodos para el secado se tienen:

### **1.2.1 Liofilización o Secado por Congelación**

La liofilización es un proceso donde la materia prima congelada es colocada dentro de un sistema de vacío refrigerado y, sin descongelar, es deshidratada. El hielo que rodea al producto se sublima y se convierte en vapor de agua. Durante el proceso de liofilización, la estructura celular permanece intacta. El producto secado por congelación mantiene también el color, la forma, el sabor y los valores nutricionales de la materia prima, mejor que otros métodos de secado (Desrosier, 1991).

### **1.2.2 Secado por tambores o Secado por rodillos**

En el proceso de secado por rodillos o de tambor, la materia prima en forma de pasta o puré es secada al ser vaciada sobre dos rodillos calentados por vapor que se encuentran girando, originando hojas de producto que se adhieren a los rodillos y que posteriormente son retiradas con una navaja. El producto resultante posteriormente es molido para producir ya sea hojuelas o polvo. Los ingredientes secados mediante éste proceso se reconstituyen de manera inmediata, reteniendo mucho de su sabor, color y valor nutricional original, pero a un precio económico.



### 1.2.3 Congelación Rápida Individual (IQF, por sus siglas en inglés – Individual Quick Frozen)

Los ingredientes IQF son producidos esparciendo hierbas o vegetales recién cosechados como una sola capa sobre una banda transportadora que se mueve lentamente a través de un aire congelado. El resultado es un producto IQF de fácil movimiento y manejo.

### 1.2.4 Baja Humedad o Infusión de Frutos con Solutos de Azúcar

Los productos con bajo contenido de humedad son producidos reemplazando el agua en la materia prima con azúcar u otros endulzantes naturales. Las frutas son los productos que más se procesan de ésta forma. Los productos con bajo contenido de humedad retienen su color y adquieren un sabor dulce y una consistencia húmeda, sin endurecerse o ponerse en mal estado.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de distintos tipos de secadores.

Fuente: Autor

| Tipo de secado | Ventajas               | Desventajas                |
|----------------|------------------------|----------------------------|
| Liofilización  | - Sabor a fruta fresca | - Elevado costo energético |

|                                     |  |   |
|-------------------------------------|--|---|
|                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Retención de propiedades nutricionales</li> <li>- Identidad de la pieza</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de instalaciones</li> </ul>   |
| Por tambores o rodillos             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sabor fresco</li> <li>- Precio más económico</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- No existe identidad de la pieza</li> </ul>   |
| Congelación rápida individual (IQF) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sabor fresco</li> <li>- Identidad de la pieza</li> <li>- Fácil manejo</li> <li>- Bajo contenido de microorganismos</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto consumo energético</li> <li>- Alto costo de maquinaria</li> <li>- Elevado costo de mantenimiento</li> </ul> |
| Baja humedad por infusión de frutos | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Retención de color</li> <li>- Identidad de la pieza</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevado costo de insumos</li> </ul>  |

### 1.3 Secado de granos en el Ecuador

En el Ecuador actualmente existen una variedad de métodos de secado de alimentos, esto es debido a la existencia de diferentes formas de industria alimenticia y agropecuaria diferenciándose principalmente en los recursos económicos que éstas manejan, de tal modo que la utilización de tecnologías más avanzadas representan por lo general una inversión mayor, cosa que no todas las industrias pequeñas poseen.



En el caso de que el secado se lo realice con tecnología apropiada existen los denominados túneles de secado de alimentos que poseen condiciones controladas en las cuales el operador manipula a fin de que el secado de distinto alimento se realice correctamente, por lo general este tipo de secadores utilizan combustibles fósiles o energía eléctrica para su funcionamiento. Por el contrario existen secaderos de tipo artesanal, utilizados en la mayoría de casos por pequeños productores de distinto tipo de alimentos, estos han elegido realizar este proceso utilizando pequeños secadores que son contruidos a base de hormigón armado con la utilización de gas licuado de petróleo (GLP) o a su vez en los denominados tendales, secaderos artesanales que utilizan el sol para su proceso de deshidratación.

## 1.4 Parámetros a considerar en el secado de granos

El secado de granos tiene como objetivo fundamental lograr que, durante el almacenamiento, el grano conserve sus características el mayor tiempo posible. El proceso de secado de granos tiene cuatro retos:

- Disminuir el contenido de agua en los granos.
- Evitar la germinación de las semillas.
- Conservar la máxima calidad del grano y alcanzar un grado de humedad que no permita el crecimiento de bacterias y hongos, así como también retarde considerablemente el desarrollo de ácaros e insectos.

Los granos y las semillas almacenadas están sujetos a los cambios ambientales, esto cambios pueden ser de índole física, biológica, y química.

Los factores físicos tienen una influencia decisiva en el almacenamiento de los granos y las semillas.

Los factores físicos más importantes son la humedad y temperatura, disponible en las estructuras de almacenamiento.





### 1.4.1 Humedad

El primer parámetro es el contenido de humedad la cual puede ser definida de dos maneras como explica (Strumillo, 1986).

Base seca

$$X = \frac{mA}{mS} = \frac{kg \text{ de humedad}}{kg \text{ de material seco}} \quad (1.1)$$

Base húmeda

$$X' = \frac{mA}{m} = \frac{mA}{mA + mS} = \frac{kg \text{ de humedad}}{kg \text{ de material mojado}} \quad (1.2)$$

De donde:

$mA$  = Masa de material húmedo

$mS$  = Masa de material seco

La humedad del ambiente (humedad relativa) y la temperatura, afectan el contenido de humedad. El grano viene del campo con contenidos de humedad altos (20% o más) impidiendo su almacenamiento "seguro" (10% a 15%). Para calcular el porcentaje de humedad en los granos, se suele utilizar la (Ec.1.1).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{100 * \text{Peso del grano seco}}{\text{Peso del grano humedo}} \quad (1.3)$$



El grano con niveles seguros de humedad experimentara problemas menores por el ataque de microorganismos e insectos durante su almacenamiento.

En el secado existen algunos valores característicos que identifican estados en el contenido de humedad.

### **1.4.2 Equilibrio en el contenido de humedad**

Se denomina humedad de equilibrio del sólido, a la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el aire en las condiciones dadas. La humedad de equilibrio es el límite al que puede llevarse el contenido de humedad de una sustancia por contacto con aire de humedad y temperatura determinadas (Ocon-Tojo, 1970).

### **1.4.3 Contenido crítico de humedad**

Según Dávila (2004), el contenido crítico de humedad es una característica en la que ocurre un cambio en las condiciones de secado ya que pasa del secado a velocidad constante a la velocidad decreciente de secado, se describe a continuación las variables y condiciones del proceso.

### **1.4.4 Temperatura**

Las temperaturas bajas son las mejores para almacenar granos. El grano respira muy lentamente, se genera poco calor dentro del grano, y, se reduce la actividad y respiración de insectos y hongos.

Los microorganismos (hongos) que atacan el grano almacenado se desarrollan rápidamente a temperaturas mayores de 25° C, con un rango óptimo entre 28 y 32°C con humedad disponible.

Según se desarrollen, la temperatura irá en aumento debido a su metabolismo y crecimiento, causando la descomposición del grano.

Durante la etapa de almacenamiento, se consideran dos temperaturas: la temperatura externa y la temperatura interna del almacén. Dependiendo de los materiales de construcción del almacén, la variación entre las dos temperaturas será más o menos pronunciada.

### 1.4.5 Curva de secado

Un proceso de secado es descrito usualmente por diagramas con los siguientes aspectos:

1. Contenido de humedad contra tiempo de secado (*Curva de secado*).
2. Velocidad de secado contra contenido de humedad del material (*Curva de velocidad de secado*).
3. Temperatura del material contra contenido de humedad (*Curva de temperatura*).

Estas curvas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio donde se mide el cambio de masa y temperatura con el tiempo a base de muestreo. El proceso de secado es obtenido con estado estable teniendo  $T_g, U_g$  y  $Y$  como constantes. Usando aire caliente como agente de secado. La letra  $Y$  es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire. Esto quiere decir el peso de masa de vapor de agua por peso de masa de aire seco.

$$Y = \frac{mA}{mB} = \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}} \quad (1.4)$$

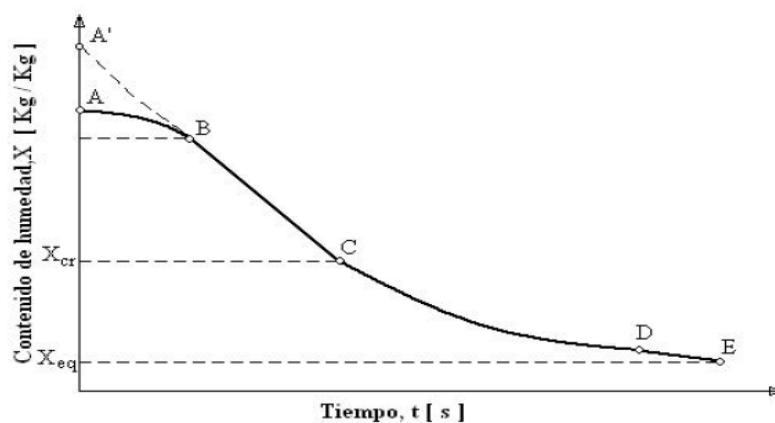


Fig. 1: Curva de secado.

Fuente: Dávila Nava, 2004.

Este tipo de curva muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado (Fig.1). En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A-B. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal del tipo  $X = f(t)$ , en este periodo la velocidad de secado es una recta constante (B-C). El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico (C) donde la línea recta tiende a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad  $X_{eq}$  donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado, esto quiere decir que el punto (E) nunca es tocado.

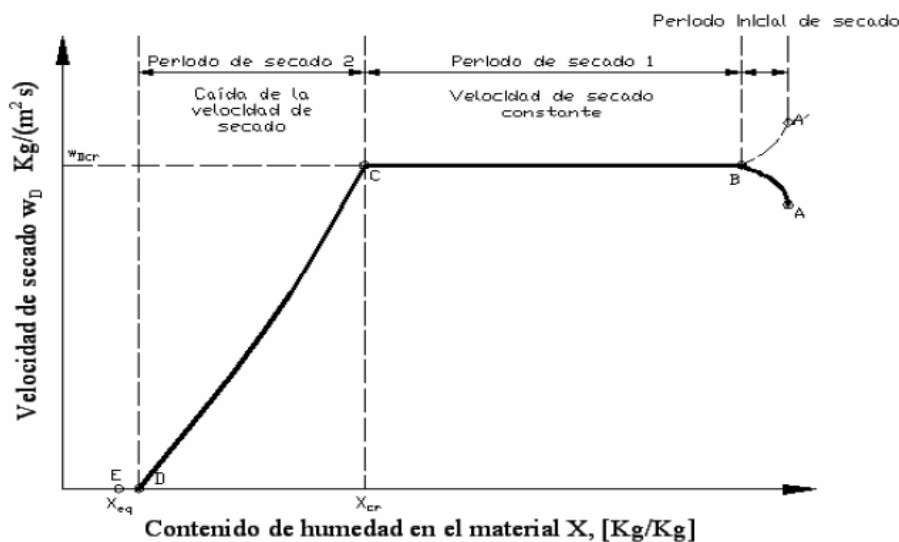


Fig. 2: Curva de velocidad de secado.

Fuente: Dávila Nava, 2004.

Este tipo de curva indica con que velocidad se seca el material (Fig.2). Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Este diagrama tiene la función  $WD = f(X)$ , donde muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.



$$WD = -\frac{mdX}{Adt} \quad (1.5)$$

O como:

$$N = \frac{dX}{dt} \quad (1.6)$$

De donde

*WD = Velocidad de secado del material, por unidad de tiempo y superficie secada*

*N = Diferencial de la humedad respecto del tiempo de secado*

En esta gráfica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado está conectada con el fenómeno de transferencia de masa y calor. Antes del secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire. Considerando la resistencia de la transferencia de masa, tenemos las condiciones externas y la capa circulante de gas; limitando la velocidad de secado. Así la velocidad de evaporación puede expresarse como el coeficiente de transferencia de masa y un gradiente de humedad del aire.

$$WD = Kg(Y_s - Y) \quad (1.7)$$

Donde Y y Ys son la humedad del ambiente circulante. El coeficiente de transferencia de masa Kg para una velocidad de gas constante en relación con el material, permanecerá constante. La humedad Ys corresponde a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido Ts. Como la evaporación de la humedad requiere de la misma cantidad de calor latente de vaporización, la superficie del líquido después de algún tiempo alcanzará una temperatura de equilibrio (Periodo



inicial de secado), así la cantidad de calor que se provee hacia la superficie desde el aire circulante será igual al calor necesario para el cambio de fase. La humedad  $Y_s$  permanece constante. Como resultado de los parámetros constantes del proceso, la humedad, la humedad del aire  $Y$  no cambia. La velocidad de evaporación entre los puntos B y C será constante e igual a  $WD_{cr}$ . Este valor es igual a la velocidad de evaporación en una superficie libre. Sin embargo se ha demostrado que  $WD_{cr}$  depende del tipo de material secado y usualmente es menor que el 30% de los valores obtenidos en el proceso de la evaporación de líquidos en una superficie libre.

Como es sabido en el periodo inicial de secado, el cuerpo a secar y sus superficie están cubiertas con una capa de líquido, teniendo una temperatura menor a la temperatura de equilibrio  $T_s$  y como resultado, la velocidad de secado en el rango entre los puntos A y B se incrementa hasta que la temperatura de la superficie alcanza el valor correspondiente a la línea B-C. Es más raro cuando el secador es alimentado con material húmedo a una temperatura  $T > T_s$ . Entonces el periodo inicial de secado está representado por la línea punteada A'-B. Usualmente el periodo desecado inicial es muy corto y en la práctica puede ser despreciado.

Cuando  $X < X_{cr}$  la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Como resultado, la presión de vapor arriba de la superficie del material también empieza a decrecer de acuerdo a la (Ec.1.7) la velocidad de secado decrece. Entonces se tiene el período de caída de velocidad de secado (Curva C-D) en este período la velocidad de secado es controlada por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) las cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad.

#### 1.4.6 Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material a secar, esto definirá las características de la curva de secado correspondiente, el tiempo de secado se debe determinar indistintamente para cada uno de los periodos de secado. Para el secado de granos se consideran dos etapas durante el proceso, a velocidad constante y a velocidad decreciente. (Páez, 1990)

La (Ec.1.8) define la velocidad de secado, esta puede reacomodarse para obtener el tiempo de secado.

$$\int_0^t dt = -\frac{ms}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{WD} \quad (1.8)$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo  $t$ , respectivamente, el secado en este periodo es constante y por tanto de la (Ec.1.8) se obtiene el tiempo para la primera parte del periodo de secado.

$$tI = \frac{ms}{AWDI} (X_1 - X_{cr}) \quad (1.9)$$

Obsérvese que  $X_2 = X_{cr}$  en la (Ec.1.8) esto es porque representa el contenido de humedad al final del primer periodo. En este período de secado influye la velocidad de secado  $WDI$  y depende de los coeficientes de transferencia de calor y masa  $h$  y  $Kg$  entre el agente de secado y la superficie a secar.

Sin embargo los materiales porosos representan un reto debido a su temperatura no uniforme que crea dificultades en la estimación del contenido crítico de humedad. Es por eso que a veces es mejor hacer experimentos bajo condiciones similares a las que se usan en la industria.

### 1.4.7 Período de caída de secado

Este periodo de caída de secado puede comportarse de manera lineal, como lo muestra la curva de velocidad de secado (Fig. 2) pero también puede comportarse de manera no lineal por lo cual requiere un estudio más minucioso del comportamiento de la curva de secado. En este estudio consideraremos el caso lineal de caída de la curva de secado.

La forma de la curva depende del tipo de cuerpo, la velocidad de secado en el primer periodo, el contenido crítico y la humedad, tomando la (Ec.1.8), podemos construir una ecuación similar en la cual la velocidad de secado depende del contenido de humedad (Dávila,2004).

$$t_{II} = \frac{ms}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{WD_{II}} \quad (1.10)$$

Donde  $X_2$  es el contenido final de humedad en la materia, observando la (Fig.2) podemos decir que existe una dependencia de  $WD_{II} = f(X)$  que es lineal y puede ser escrita de la siguiente manera:

$$WD_{II} = aX + b \quad (1.11)$$

Sustituyendo en la (Ec.1.10), se obtiene:

$$t_{II} = \frac{ms}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{aX + b} \quad (1.12)$$

Realizando la integración obtendremos:

$$t_{II} = \frac{ms}{aA} \ln \frac{aX_{cr} + b}{aX_2 + b} \quad (1.13)$$

Donde los coeficientes serán:

$$a = \frac{WD_I - WD_{II}}{X_{cr} - X_2} \quad (1.14)$$





$$WDII = aX_2 + b \quad (1.15)$$

Sustituyendo estos coeficientes en la (Ec.1.13) se obtiene:

$$t_{II} = \frac{ms}{A} \frac{X_{cr} - X_2}{WDI - WDII} \ln \frac{WDI}{WDII} \quad (1.16)$$

Finalmente, el tiempo total del proceso es la suma de los tiempos tomados en los dos períodos.

$$t = t_I + t_{II} \quad (1.17)$$

De donde

$t$  = tiempo de secado

$t_I$  = tiempo de secado en el primer período

$t_{II}$  = tiempo de secado del segundo período

$X_1$ ,  $X_2$  y  $X_{cr}$  = Contenido de humedad, inicial, final y crítica respectivamente

## 1.5 Secado del grano de cacao en Ecuador

El secado de granos de cacao, actualmente se lo realiza de varias formas dentro de las cuales las más difundidas son el secado artesanal al sol y artificial, que origina una

serie de problemas que afectan los costos y la calidad de los granos. El secado constituye un "cuello de botella" para la mayoría de las plantas de acopio en Ecuador, sobre todo aquellas ubicadas en las regiones en donde la recepción del grano se lleva a cabo en un período muy corto. Según la FAO<sup>3</sup> (1996), las dificultades que acarrea se deben a una serie de factores, tales como:

1. El costo del secado es alto, por la inversión que representa la secadora y los equipos auxiliares, y por los elevados valores de los consumos de combustible y energía eléctrica para su funcionamiento.
2. La gran acumulación de granos húmedos que se acopian en los momentos de mayor cosecha, exige un manejo muy cuidadoso de dichas partidas, y obliga a realizar en muchas oportunidades secados rápidos o violentos, que pueden causar deterioro de la calidad y aumentar las pérdidas.
3. Las técnicas de secado requieren el conocimiento de personal especializado competente, para reducir al mínimo aquellos inconvenientes. La experiencia demuestra que una de las fallas más importantes observadas en las empresas de acopio es la carencia de una adecuada capacitación de dichos operarios, en la mayoría de los casos

## 1.6 Importancia del secado de grano de cacao en Ecuador

El secado de granos de cacao contribuye a prolongar la vida del producto, evita el crecimiento de microorganismos. Un proceso de secado óptimo, cumpliendo con aspectos técnicos reduce costos de producción, transporte, así como costos de mantenimiento del producto. Por tanto evita operaciones destinadas a proteger la vida de estante, como el uso de conservantes y procesos de refrigeración, que se traducen en costos del producto.

La deshidratación además incrementa la capacidad de exportar al reducir volúmenes que se reflejan en costo de precios CIF<sup>4</sup> y FOB<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> FAO 1996. <http://www.fao.org/docrep/x5028s/X5028S00.htm#Contents>

<sup>4</sup> Es el valor de mercado en las fronteras aduaneras de un país, de las importaciones de mercancías, otros bienes, etc., incluidos todos los costos de transporte y seguros de los bienes desde el país exportador al país de que se trata, pero excluido el costo de descarga del barco, aeronave, etc.



## 1.7 Conclusiones capítulo I

El secado de cacao requiere de varios aspectos técnicos a considerar para el desarrollo normal del proceso. Entre las variables y métodos que se deben controlar están la temperatura, humedad y cinética de secado.

Al momento de elegir un método de secado de granos, debemos tener en cuenta el factor económico que representa la utilización de éste. Si bien es cierto el secado solar aprovecha un recurso inagotable como es la radiación solar, se entendería como una opción económicamente factible, es decir, los costos energéticos son menores a un secado con energía convencional. Pero, puede darse el caso de que el tiempo de secado sea mayor, y por el contrario represente pérdidas que se traducirán en aumento de costos; para cualesquier caso siempre se deberá hacer una comparación costo-beneficio entre los procesos a fin de aprovechar al máximo los recursos disponibles.

Técnicamente, se deben considerar los parámetros del proceso de secado como tiempos de secado, curvas de velocidad, temperatura, humedad, radiación solar etc. Y llevarlos a condiciones controladas para obtener datos estadísticos que nos permitirán determinar la eficiencia del método de secado.

---

<sup>5</sup> Significa que la mercadería es puesta a bordo del barco con todos los gastos, derechos y riesgos a cargo del vendedor hasta que la mercadería haya pasado la borda del barco, con el flete excluido.



## CAPITULO II

### SECADO DEL GRANO DE CACAO

#### 2.1 Introducción

El secado es una etapa en la que se elimina el exceso de humedad de los granos por calentamiento y se completa la formación del aroma y sabor a chocolate. Al finalizar la fermentación del cacao el grano queda con un contenido de humedad de aproximadamente 60%, que debe ser reducido hasta un valor próximo a 8% para evitar el desarrollo de mohos que deterioran la calidad (Rohan, 1964) y además para facilitar el almacenamiento (Cros y Jeanjean, 1995; Jinap *et al.*, 1994), transporte, manejo y comercialización del cacao. Es recomendable reducir la humedad hasta valores del 6 a 7%, máximo 8% (COVENIN, 1995a), ya que si se reduce demasiado la cáscara se vuelve muy quebradiza, en caso contrario existe el riesgo del crecimiento de hongos al almacenar el grano (Rohan, 1964). Durante el secado continúa la fase oxidativa de la fermentación, por lo que juega un papel importante en la disminución de la astringencia, amargor y acidez del grano, así como en el desarrollo del color marrón a partir de los compuestos fenólicos, lo que ocurre solamente en esta etapa (Cros y Jeanjean, 1995; Jinap *et al.*, 1994). Entre los métodos de secado, el más utilizado es el secado por exposición al sol en patios de cemento con diferentes texturas, como la rugosa, lisa e intermedia.

## 2.2 Demanda mundial del cacao

A pesar de que el cacao se produce en los países en desarrollo, se consume principalmente en los países desarrollados. Los compradores en los países consumidores son los transformadores y los productores de chocolate. Unas pocas compañías multinacionales dominan tanto la transformación como la producción de chocolate. El siguiente gráfico representa los principales consumidores de cacao, basado en el consumo doméstico aparente de cacao, que se calcula sumando las moliendas a las importaciones netas de productos de cacao y de chocolate en equivalente en grano.

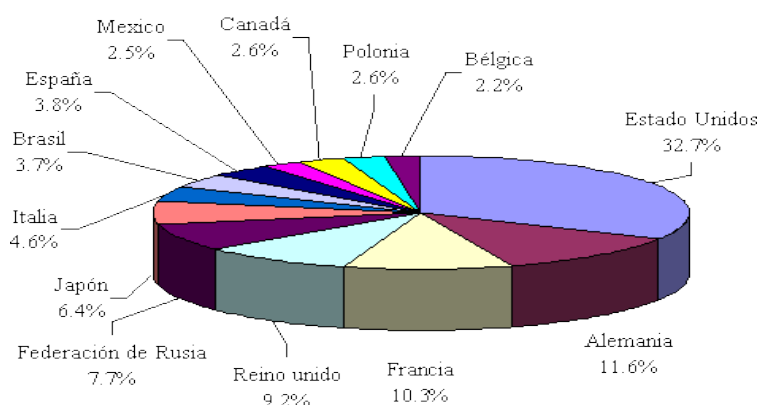


Fig. 3: Principales países consumidores 2004-2005.

Fuente: UNCTAD<sup>6</sup>.

Tomando en cuenta las estadísticas de los últimos 30 años, se puede ver que con la excepción de ocho años, la oferta de cacao ha sido superior a la demanda. El siguiente gráfico presenta el balance de producción y consumo de cacao de los últimos 30 años, considerando a las moliendas como demanda primaria de cacao en grano.

<sup>6</sup> (UNCTAD) United Nations Conference on Trade and Development

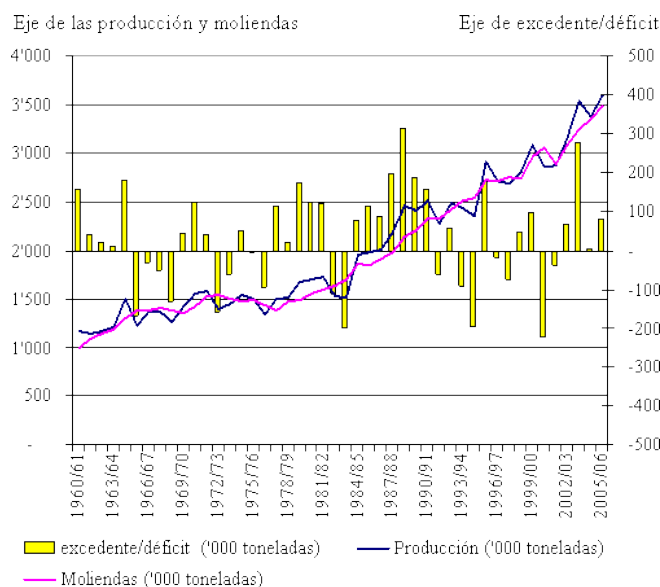


Fig. 4: Producción mundial de cacao en grano, moliendas y balance oferta/demanda de 1960/61 a 2004/05.

Fuente: UNCTAD.

## 2.2.1 Demanda del cacao ecuatoriano

La demanda del cacao ecuatoriano en los mercados internacionales se coloca alrededor de las 92500 toneladas métricas durante el año 2012, siendo los principales destinos los estados unidos y países Europeos como se ilustra en la (Fig. 5).

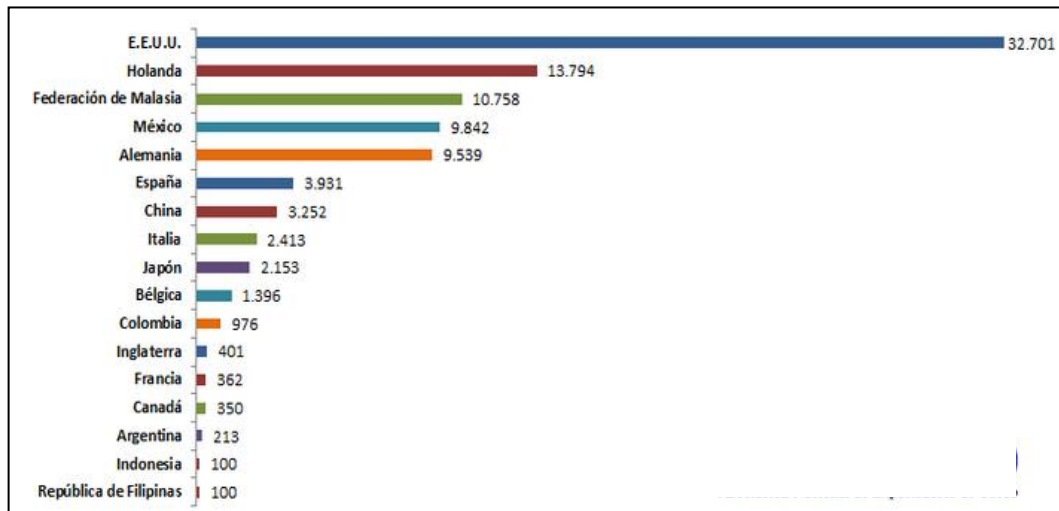


Fig. 5: Distribución de la demanda de cacao ecuatoriano 2012.

Fuente: Anecacao<sup>7</sup>, 2012

## 2.3 Producción de cacao en el Ecuador

Según Rosero (2002), un concepto significativo de la competitividad a nivel nacional es la productividad nacional. El nivel de vida depende de la capacidad de las firmas de una nación para alcanzar altos niveles de productividad y para aumentar la productividad con el transcurso del tiempo.

El grueso de la producción mundial de cacao se concentra en una banda tropical que no supera, ni por el norte ni el sur, los 100 de latitud. Aunque puede llegar a producirse hasta 500 metros sobre el nivel del mar, los mejores resultados se obtienen por debajo de los 200 metros.

El cacao requiere un clima constantemente lluvioso. Las zonas con estaciones secas y lluviosas muy marcadas no le son propicias. Necesita unas precipitaciones no inferiores a los 1.500 milímetros anuales lo mejor distribuidas posible. En materia de suelos el cacao no es muy exigente, pero se puede decir que el cacao tipo criollo necesita tierras con alto contenido de humus y el forastero precisa que tenga una buena proporción de materia orgánica.

En Ecuador, los árboles de cacao tienen, comúnmente, una floración bianual. La floración más importante es en diciembre y enero y la maduración del fruto se produce en un período de cuatro a seis meses.

<sup>7</sup> (Anecacao) Asociación Nacional de Exportadores de Cacao

Una planta de cacao toma de 3 a 5 años para producir su primera cosecha, aunque existen variedades que producen a una edad más temprana. El tiempo en que el árbol de cacao es productivo puede llegar a los 25 años, existiendo factores como el atmosférico, la variedad del árbol de cacao, mantenimiento, etc., que influyen en el tiempo de vida de la plantación.

La cosecha de mayor volumen tiene lugar en abril, mayo y junio. Las principales provincias ecuatorianas productoras de cacao son Los Ríos con el 35%, Guayas con el 25%, Manabí con el 14%, Esmeraldas con el 8%, El Oro con el 5%, Bolívar y Cotopaxi con el 3% y Pichincha con el 4% de la superficie productora.

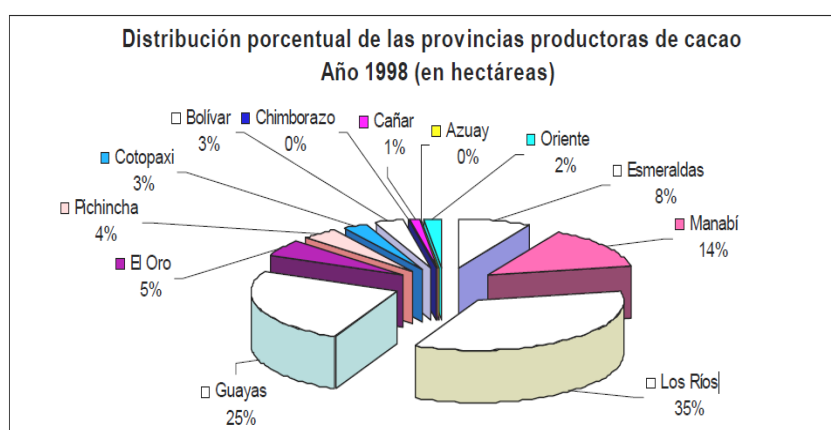


Fig. 6: Distribución de la producción de cacao Ecuador.

Fuente: SICA<sup>8</sup>, 1998

Las principales zonas productoras de cacao fino y de aroma del Ecuador son:

□□□Guayas: Milagro, Lorenzo de Garaycoa, Mariscal Sucre, Roberto Astudillo, Bucay, Naranjal, Yaguachi, El Empalme, Naranjito y Balao.

□□□Los Ríos: Vines, San Juan, Pueblo Viejo, Ventanas, Mocache y Quevedo.

□□□Bolívar: Echeandía.

□□□Manabí: Chone y Calceta.

□□□El Oro: Pasaje y Santa Rosa.

<sup>8</sup> (SICA) Servicio de información y censo agropecuario



La producción del cacao ecuatoriano se encuentra ligada a las condiciones del ecosistema, lo que determina un rendimiento diferente al de otros países productores. Entre los factores más importantes que influyen en el rendimiento se encuentra la mala distribución de las lluvias; escasas horas de luz; enfermedades, como la monilla y escoba de bruja; insectos desfoliadores; edad avanzada de los árboles; pérdida de fertilidad del suelo; falta de zonificación del cultivo; problemas de comercialización interna (no se cumple las clasificaciones establecidas por la Norma INEN 176).<sup>9</sup>

Tabla 2: Requisitos para la calidad del cacao.

Fuente: INEN<sup>10</sup>, 2000

| Requisitos   | Unidad   | Cacao Arriba |           |           |           |           | CCN-51    |
|--|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|  |          | ASSPS        | ASSS      | ASS       | ASN       | ASE       |           |
| Cien granos pesan  | g        | 135-140      | 130-135   | 120-125   | 110-115   | 105-110   | 135-140   |
| Buena fermentación (mínimo)  | %        | 75           | 65        | 60        | 44        | 26        | 65***     |
| Ligera fermentación* (mínimo)  | %        | 10           | 10        | 5         | 10        | 27        | 11        |
| <b>Total fermentado (mínimo)</b>   | <b>%</b> | <b>85</b>    | <b>75</b> | <b>65</b> | <b>54</b> | <b>53</b> | <b>76</b> |
| Violeta (máximo)   | %        | 10           | 15        | 21        | 25        | 25        | 18        |
| Pizarroso/pastoso (máximo)   | %        | 4            | 9         | 12        | 18        | 18        | 5         |
| Moho (máximo)  | %        | 1            | 1         | 2         | 3         | 4         | 1         |
| Totales (análisis sobre 100 pepas)   | %        | 100          | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       |
| Defectuoso (máximo) (análisis sobre 500 gramos)  | %        | 0            | 0         | 1         | 3         | 4**       | 1         |
| ASSPS      Arriba Superior Summer Plantación Selecta<br>ASSS        Arriba Superior Summer Selecto<br>ASS         Arriba Superior Selecto<br>ASN         Arriba Superior Navidad<br>ASE         Arriba Superior Época<br>* Colocación marrón violeta<br>** Se permite la presencia de grana solamente para el tipo ASE.<br>*** La coloración varía de marrón violeta |          |              |           |           |           |           |           |

Las siglas ASSPS, ASSS, ASS, ASN, ASE representan el tipo de cacao en grano exportado, con el cual se puede identificar el tipo de cacao que tiene un mejor precio<sup>11</sup>

<sup>9</sup> Norma de calidad del grano de cacao; <http://www.anecacao.com/images/inen176.pdf>

<sup>10</sup> (INEN) Instituto Ecuatoriano de Normalización

<sup>11</sup> Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Proyecto: Calidad de los alimentos vinculada con el origen y las tradiciones en América Latina, "Diagnostico de la cadena de valor del Cacao en el Ecuador", 2010



Así, el tipo genético del cacao, el medio donde se desarrolla el cultivo, el manejo integral del mismo, así como sus métodos de fermentación y almacenamiento son factores que inciden en la calidad del producto. La calidad del cacao es controlada a través de técnicas de muestreo.

En Ecuador, el 90% de la superficie cultivada de cacao corresponde a pequeños agricultores de 1 a 20 hectáreas, el 9% a medianos agricultores entre 21 y 50 hectáreas, y tan sólo el 1% con un hectareaje superior a 50.

De la superficie cultivada de cacao en Ecuador, se considera que unas 100.000 has. Deben entrar a un proceso de renovación y el resto de plantaciones a un proceso de rehabilitación. (Rosero, 2002)

### 2.3.1 El cacao y sus variedades

Cacao (*Theobroma cacao* L.) es una especie tropical preferentemente alogamous leñosas anteriormente en la familia Sterculiaceae (Cuatrecasas, 1964) y reclasificado en la familia Malvaceae (Alverson et al., 1999). El origen geográfico de cacao es América del Sur (Motamayor et al., 2002), donde varias poblaciones silvestres se encuentran en las regiones del Amazonas y Guyaniano. Es considerado uno de los cultivos perennes más importantes del planeta, con una producción mundial estimada de 3,5 millones de toneladas en 2006 (ICCO, 2007).

Existen tres variedades clásicas del cacao.

- **Criollo:** Es la variedad primitiva, que crecía en América central cuando llegaron los colonizadores españoles. Se considera una variedad de cacao fino de aroma lo que le hace muy apreciada para obtención de polvo de cacao con el que se producirán chocolates de calidad mucho más dulces y con menos amargos que en el resto de variedades. El criollo presenta granos grandes, carnosos, redondeados, de cotiledones blancos y de alta calidad que desarrollan una adecuada intensidad aromática (Lemus, 2001) Se cultiva

principalmente en América central, México, Indonesia. De momento solo ocupa un 10% de la producción mundial aunque su cultivo se va expandiendo.

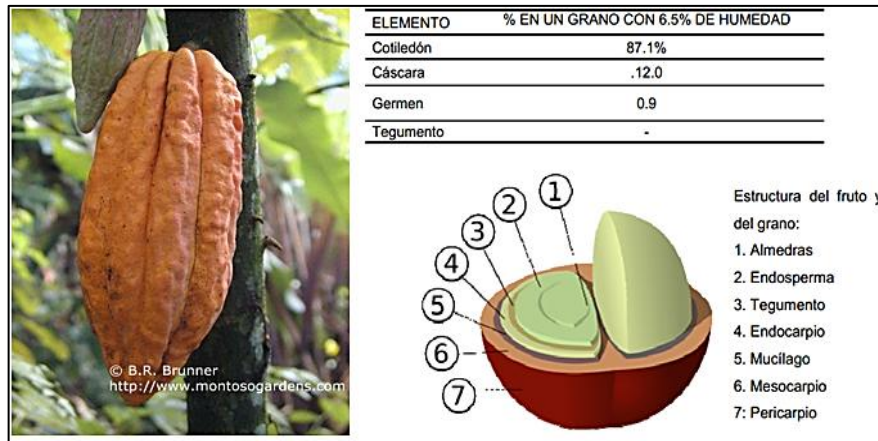


Fig.7: Variedad de cacao criollo.

Fuente: Guachamín, 2008.

- **El forastero:** Es la variedad más abundante ya que representa el 90% de la producción mundial. Los forasteros fueron localizados en la cuenca del río Amazonas; siendo este genotipo el que sienta las bases del cultivo en América del Sur (Figueira *et al.*, 1994; N' Goran *et al.*, 1994).



Fig.8: Variedad de cacao forastero.

Fuente <http://dontmesswithourchocolate.guittard.com/index.asp>, 2012

- **El Trinitario:** Procede de una variedad obtenida en la isla de Trinidad, a base de cruzar las dos especies anteriores. Es más aromático que el forastero y más resistente que el criollo. Considerados como un tipo intermedio entre los criollos y forasteros (Warren, 1994; Ronning y Schnell, 1994).



Fig.9: Variedad de cacao trinitario.

Fuente <http://dontmesswithourchocolate.quittard.com/index.asp>, 2012

- **Cacao CCN51<sup>12</sup>:** Es una variedad desarrollada en el Ecuador, se caracteriza por su resistencia a las enfermedades fungosas y por la gran productividad de los arboles obtenidos que superan en 4 veces el rendimiento de las variedades clásicas. Los frutos contienen una proporción elevada de grasa y poca cascara. Representa una alternativa aceptable para producir chocolates muy finos (Espinosa, 2006).

---

<sup>12</sup> (CCN51) Clon Castro Naranjal 1951



Fig.10: Variedad de cacao CCN51.

Fuente: Autor

El Ecuador produce actualmente un 81,4% de cacao Nacional (Arriba), 17,6% de CCN-51 y 1% de Criollo junto a otras especies desarrolladas.<sup>13</sup>

### 2.3.2 Etapas en el cultivo y tratamiento del cacao

En general el manejo del cultivo de cacao tiene las siguientes etapas:

1. Poda (1 o 2 veces al año)
2. Fertilización ( 1 o 2 veces al año)
3. Cosecha ( varias al año)
4. Fermentación
5. Secado

### 2.3.2 La Poda del cacao

La poda es una práctica de manejo que consiste en quitar las ramas inservibles del árbol de cacao para dar a la planta una mejor formación de la copa y estimular la aparición de brotes , flores y frutos (Quiroz, 2012).

Según Quiroz (2012), existen 4 tipos de podas diferentes entre las cuales están la de formación, fitosanitaria, mantenimiento y rehabilitación.

<sup>13</sup>

FAO2010.<http://www.fao.org/fileadmin/templates/olq/documents/Ecuador/ppp/taller%20nacional%20ecuador/2DiagnosticoCadenaCacaoSergioPino.pdf>



La poda, especialmente de mantenimiento, es la base de todas las medidas de control cultural, ya que su correcta y sistemática aplicación, por lo menos una vez por año, permite:

- Mantener el árbol con la altura adecuada (máximo cuatro metros), para facilitar la cosecha de todos los frutos maduros y remover los enfermos.
- Permitir la circulación del aire y la entrada de los rayos solares a las partes internas del árbol, con el fin de disminuir la humedad.
- Facilitar cualquier medida sanitaria que se decida aplicar, por ejemplo la aspersión de un producto fitosanitario.

La poda consiste en eliminar chupones y ramas sobrantes o mal ubicadas, partes secas de la planta, permite curar heridas y darle claridad interna al árbol.

Todo esto con el fin de prolongar la vida útil del árbol, aumentar el rendimiento biológico y por ende su capacidad productiva. Una disminución drástica del follaje, por podas fuertes, afecta considerablemente la cosecha y puede ocasionar daños en la corteza por sensibilidad, al cambiar abruptamente de la penumbra a una exposición fuerte del sol. En lo posible, las podas deben ser ligeras, buscando una estructura adecuada del árbol, mejorando la aireación y una apropiada penetración de luz para lograr una mejor fotosíntesis, entre los tipos de poda se tienen:

#### **a. Poda de Formación:**

Se inicia al año de haber establecido la plantación y consiste en lograr un rápido desarrollo del área foliar del árbol, para lo cual se eliminan o cortan las puntas de las ramas que van hacia abajo (suelo). Se debe propiciar un crecimiento erecto de la planta.

La poda de formación tiene por objeto estructurar las plantas con ramas proporcionadas y bien orientadas, formadas a una altura conveniente.

En esta poda se puede formar una rama principal dándole la forma de un “árbol” o se pueden formar hasta 5 ramas primarias que serán las futuras productoras de mazorcas.

En esta fase debe evitarse en todo momento el uso de serrucho y tijeras de podar. Para eliminar brotes tiernos indeseables debe hacerse en forma manual.





**b. Poda de mantenimiento:**

Se realiza a partir de los dos años de edad manteniéndose durante la vida útil de la planta. El objeto de esta poda es mantener la arquitectura de los árboles, disponer el follaje de modo tal que facilite la llegada de la luz solar a las hojas favoreciendo la fotosíntesis y controlar la altura de la plantación.

Para lograr este tipo de poda se eliminan las ramas que se entrecruzan, se eliminan las ramas enfermas, los “chupones” mal ubicado en el árbol, las que desarrollan hacia arriba, los que tienen un crecimiento hacia el suelo, se despunta para realzar el árbol de manera que permita la aireación, permitiendo manejar cómodamente las prácticas de manejo y cosecha del cultivo.

**c. Poda de rehabilitación:**

En los primeros años se le suprime las ramas bajas con el fin de que llegue a buena altura y después se le hacen podas periódicas oportunas para que su tallo sea recto y su copa con ramificación abierta que proyectará una sombra “racimal” para el cultivo. En general la poda se debe realizar los cortes con herramientas adecuadas serruchos o cuchillos bien afilados, evitando desgarraduras de la corteza (Sánchez, 2007).

### 2.3.3 Fertilización

Países americanos y africanos, reconocidos productores de cacao, han adelantado numerosos estudios sobre fertilización. En Trinidad, experimentos sobre fertilización, distancia de siembra y sombra, señalan la importancia de utilizar mezclas completas de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en cacao a plena exposición solar. En México, se demostró una buena respuesta a la aplicación de N. En este caso se indica la amplia relación C/N de los residuos sobre el campo que hace necesaria la aplicación de altas cantidades de este elemento (Quiroz, 1981).

Experimentos en Brasil han demostrado que la fertilización del cacaotero bajo sombra solamente produce pequeños incrementos en producción, mientras que la fertilización



de cacao a plena exposición solar produce incrementos considerables en rendimiento de grano seco (Pinto, 1962; Murria, 1982).

La fotosíntesis es mucho más intensa en una plantación sin sombra y la respuesta a la fertilización es alta. Sin embargo, cuando se suprime todo el sombrío y no se fertiliza, los rendimientos se reducen apreciablemente con el tiempo y la plantación entra en senescencia temprana (Pinto, 1962; Murria, 1982).

Los incrementos en producción documentados en experimentos conducidos en África son muy interesantes. Experimentos conducidos en Ghana, evaluados por 3 años consecutivos que se iniciaron en una plantación de 9 años de edad, demostraron que la aplicación de fertilizantes sin remoción de sombra incrementó la producción en un 25%. La simple remoción del sombrío elevó la producción de 750 a 2875 kg/ha (Pinto 1963, citado por Llano y Castaño 1997).

En general, la fertilización se la realiza manualmente o utilizando bombas de fumigación, cuando el nutriente se lo aplica de forma foliar. La tabla adjunta muestra el rendimiento de cacao por hectárea con distintos tratamientos de nutrientes frente a un testigo el cual no ha sufrido tratamiento, y se observa que manteniendo constante el fósforo y subiendo las dosis de nitrógeno y potasio se mejora el rendimiento en kilogramos por hectárea.

Tabla 3: Efecto de niveles crecientes de N y K en el rendimiento de cacao en Landázuri, Colombia.

Fuente: Uribe, 2010.

Rendimientos promedio de 5 años (1991-1995).



| ----- Tratamientos, kg/ha ----- |                               |                  | Rendim. |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------|---------|
| N                               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | kg/ha   |
| 50                              | 90                            | 50               | 560     |
| 100                             | 90                            | 50               | 574     |
| 150                             | 90                            | 50               | 572     |
| 50                              | 90                            | 100              | 601     |
| 100                             | 90                            | 100              | 650     |
| 150                             | 90                            | 100              | 943     |
| 50                              | 90                            | 200              | 819     |
| 100                             | 90                            | 200              | 1049    |
| 150                             | 90                            | 200              | 1160    |
| Testigo                         |                               |                  | 562     |

### 2.3.4 Cosecha

La cosecha se inicia cuando el fruto o mazorca está maduro. La madurez de la mazorca se aprecia por su cambio de pigmentación: de verde pasa al amarillo o del rojo y otros similares al amarillo anaranjado fuerte o pálido. No obstante, en frutos de coloración roja – violácea muy acentuada el cambio de color puede no ser muy aparente y se corre el riesgo de no cosechar a tiempo las mazorcas que han alcanzado madurez plena. Debido a esta dificultad las mazorcas pueden madurar y germinar. Cuando existen dudas respecto del estado del fruto maduro basta golpearlo con los dedos de la mano y si se produce un sonido hueco es señal de que el fruto está maduro.<sup>14</sup>

No debe recolectarse frutos verdes o verde amarillentos, porque tiene influencia desfavorable sobre la fermentación.

Si se aguarda mucho tiempo para recolectar una mazorca madura existen serios riesgos de podredumbre y germinación de las almendras. Además, la cosecha de frutos verdes, pintones y maduros disminuye el rendimiento de los granos en peso y en calidad. La cosecha se debe realizar frecuentemente. En temporada de mayor producción la cosecha debe ser semanal; mientras que en épocas lluviosas debe darse cada quincena; en tanto que en períodos secos cada treinta días. Las herramientas que se utilizan para la cosecha son: la tijera de podar, el podón o "pico

<sup>14</sup> Manual del cultivo de cacao, MINAG, Perú 2004.

[http://webmail.radiomaranon.org.pe/redmaranon/archivos/cacao\\_manual\\_cultivo.pdf](http://webmail.radiomaranon.org.pe/redmaranon/archivos/cacao_manual_cultivo.pdf)

de loro" y escaleras tipo "A". Todas las herramientas de corte deben estar bien afiladas y desinfectadas.

Las mazorcas a cosechar deben ser seccionadas por la parte media del pedúnculo que une el fruto al árbol para evitar la destrucción del cojín floral. Si se utiliza para la cosecha el "pico de loro", es preciso cortar el pedúnculo jalando la herramienta de arriba hacia abajo, nunca en sentido contrario debido a que desgarraría el cojín floral. Se denomina quiebra a la operación que consiste en partir la mazorca y extraer las almendras las cuales una vez separadas de la placenta, serán sometidas a la fermentación. El tiempo entre el desgrane y la puesta en fermentación no debe exceder las 24 horas (Enríquez, 1985).



Fig.11: Cosecha y quiebra de cacao.

Fuente: Autor

### 2.3.5 Fermentación

Denominado también beneficio, cura o preparación. Es un proceso bioquímico interno y externo de la semilla en la que ocurren cambios notables en su estructura.

La fermentación consiste en lo siguiente:

- Descomposición y remoción del mucílago azucarado que cubre el grano fresco, para facilitar el secado y la conservación o almacenamiento.
- Elevar la temperatura que mata al embrión, para facilitar el desarrollo del sabor a chocolate.



- Destrucción de las células pigmentadas o cambios en la pigmentación interna.
- La transformación del sabor astringente de los cotiledones.
- El desarrollo de sabor y aroma del chocolate.
- Durante la fermentación los azúcares que contienen las almendras son transformados a alcoholes por las levaduras. Estos a su vez son convertidos en ácido acético por las bacterias acéticas.

Una cantidad considerable de calor se desprende durante la fermentación mientras la pulpa se desintegra. Este incremento en la temperatura es el causante de la muerte del embrión y es precisamente en este momento cuando se inician los cambios bioquímicos internos de la semilla: el cambio de color violeta a marrón claro, disminución del sabor amargo y el desarrollo de los sabores precursores del chocolate.

**Fermentación en sacos.-** Para la fermentación del cacao en costales de polietileno o yute se colocan las almendras dentro de estos, se cierran y se los deja fermentando en el piso.

Algunos agricultores suelen colgarlos para que tengan mejor aireación durante dos o tres días al cabo de los cuales son extraídas para someterlas al proceso de secado. Este método no es recomendable debido a que las almendras presentan un elevado porcentaje de granos violáceos y pizarrosos.

**Fermentación en rumas o montones.-** La fermentación en rumas o montones es bastante simple. Sobre el piso se dispone una capa de hojas de plátano que sirve de base y facilita el drenaje del exudado. Las almendras son acondicionadas sobre estas hojas formando rumas que se cubren con hojas de plátano y sacos de yute para evitar la fuga de calor que dará muerte al embrión de las semillas. Según Hardy (1961) la gradiente de temperatura generada en la masa de cacao bajo el sistema de fermentación denominada montones, está directamente relacionada con la temperatura ambiental, humedad y movimiento de aire circundante.

Estos montones deben estar expuestos directamente al sol y no bajo sombra con remociones a intervalos de 48, 72 y 96 horas que es el tiempo necesario para obtener un cacao bien fermentado por encima del 90 %. Por lo general, todo el proceso

demora 5 días. Este método tiene la ventaja de fermentar cualquier volumen y no ocasiona costo alguno.

**Fermentación en cajones.-** Para este tipo de fermentación se colocan las almendras frescas dentro de cajones fermentadores por un período de 5 días.

Para una buena fermentación, debe nivelarse uniformemente la masa de cacao en los cajones y cubrirlos con hojas de plátano, costales de yute o plástico, a fin de mantener la humedad y conservar el calor desprendido por la fermentación alcohólica. La capa de granos frescos no debe superar los 70 centímetros. De hacerlos se corre el riesgo que se compacten y reduzca la aireación de los granos además de dificultar el volteo obteniéndose una fermentación dispareja.

La razón de realizar los volteos es la de uniformizar el desarrollo de los procesos bioquímicos que se manifiestan en el curso de la fermentación. La acumulación de temperatura se inicia lentamente debido a la poca contaminación del mucílago fermentado que al airearse convenientemente, produce un efecto positivo directo.

El primer volteo se debe efectuar a las 48 horas de depositarse la masa de cacao, luego a las 72 y por último a las 96 horas, quedando apto para someterse al secado a las 120 horas (5 días). Luego de estos tres volteos las almendras tienen en promedio un 80% de humedad.

Este procedimiento permitirá lograr una fermentación más uniforme si la comparamos con los métodos anteriores (Yáñez, 2012).



Fig.12: Granos fermentados.

Fuente: [www.ecuadorexporta.org](http://www.ecuadorexporta.org), 2012

### 2.3.6 Secado

Al final de la fermentación el contenido de humedad de los granos de cacao está alrededor del 55 %. Para ser almacenados con seguridad debe reducirse a límites del 7 u 8%. El proceso de secado no constituye una simple reducción de humedad sino que los cambios químicos continúan mientras el contenido de humedad desciende con lentitud hasta que se detienen por la falta de humedad o la inactivación de las enzimas por otros medios. Por este motivo el proceso no debe ser muy rápido durante los dos primeros días, la alta temperatura puede inactivar las enzimas.

La rapidez del secado varía según el método que se emplee. El secado solar natural en patios secadores es la forma más antigua y difundida del empleo de la energía solar (Bergués, 1993). En caso que el secado sea solar; es decir, al aire libre dura de 5 a 7 días. Esto dependerá de las condiciones atmosféricas para deshidratar óptimamente las almendras. Se sabrá que ha completado el secado del cacao cuando a la presión de los dedos índice y pulgas, se rompan los granos fácilmente.

También podrá secarse el cacao en secadores calentados artificialmente, en cuyo caso deberá prepararse para que el grano no adquiera el olor a humo.





Fig.13: Secado en tendales.

Fuente: Manual del cultivo de cacao Perú, 2004.

## 2.4 Parámetros a considerar en el grano secado de cacao

La eliminación del exceso de humedad, que queda en el grano al finalizar la fermentación, es importante porque evita el desarrollo de mohos que deterioran la calidad (Rohan, 1964) y facilita el almacenamiento (Cros y Jeanjean, 1995; Jinap *et al.*, 1994), manejo y comercialización del cacao. Sin embargo, la reducción de la humedad debe ser hasta valores del 6 al 7%, máximo 8% (COVENIN, 1995), ya que si se reduce demasiado el grano se vuelve muy quebradizo (Rohan, 1964).

El desarrollo de los pigmentos de color marrón, a partir de los compuestos fenólicos, es otra fase relevante del secado, lo cual solamente ocurre en dicha etapa (Cros y Jeanjean, 1995; Jinap *et al.*, 1994). Además, los precursores del sabor, tales como aminoácidos libres, péptidos y azúcares no reductores pueden presentar algunos cambios químicos asociados con reacciones térmicas (Puziah *et al.*, 1999), lo cual conjuntamente con los cambios bioquímicos, productos de la fermentación, son determinantes de la calidad del cacao beneficiado, constituyendo un factor de peso en su comercialización y en su utilización en la agroindustria. El secado natural por exposición al sol es comúnmente usado por los productores de las diversas regiones cacaoteras del país, debido a que es un método simple, económico y que permite el manejo de pequeñas cantidades. Entre las desventajas de este método destacan el tiempo que tarda el proceso, la labor requerida, la necesidad de extensas superficies para secar los granos y además su dependencia de las condiciones climáticas (Jinap *et al.*, 1994), condiciones que pueden variar de una zona a otra y en una misma zona durante el año (Ghosh y Cunha, 1975), lo cual, va a influir sobre las horas de exposición diaria al sol y del tiempo necesario para el secado.

En la zona costera, el secado es realizado en patios de cemento y se ha observado que la textura del piso y la frecuencia de remoción de los granos no influyen sobre las





características químicas ni sobre el color del grano, en cambio sí afectan los porcentajes de cáscara, de granos partidos y múltiples (Ortiz de Bertorelli *et al.*, 2004).

El proceso en dicha región se ha venido realizando según costumbres culturales transmitidas por generación, con variaciones entre los productores y entre las zonas, sin dar importancia a las buenas prácticas en el manejo agronómico ni en el beneficio, lo que ejerce un efecto desfavorable sobre la calidad del producto final, ocasionando pérdidas. Entre las operaciones que contempla el proceso del cacao, el secado ha sido la más relegada, de allí la relevancia de su estudio, por lo que el objetivo de este trabajo consistió en evaluar algunos de los cambios físicos y químicos que ocurren en el secado natural al sol del grano fermentado de cacao tipo criollo de Cuyagua, empleando en la fermentación los dos diseños de los cajones de madera mayormente usados en la región costera del estado Aragua (Graziani de Fariñas *et al.*, 2003a), se busca generar información que sirva de apoyo a los productores de cacao para la obtención de un producto de alta calidad y a los técnicos para considerar posibles mejoras tecnológicas en el secado del cacao.

## 2.5 Secadores de granos de cacao

En la actualidad existen numerosos tipos y diseños de secadores de granos para alimentos, cada uno de ellos tiene su particularidad y obedece a condiciones tales que favorezcan a una u otra condición dentro del proceso de secado, sin duda la elección de uno u otro tipo de secador se relaciona con la economía y eficiencia del proceso, y que generalmente estas dos variables se contraponen en los distintos tipos de secado. Podría decirse que un secador que resulta más económico o que su proceso es más económico, dará como resultado baja eficiencia del producto seco. Por el contrario al aumentar los costos del equipo aumentará la eficiencia del mismo, es decir aspectos fundamentales que deben tomar en cuenta al momento de la elección de un tipo específico de secador. En América Latina, una parte importante de la producción de granos se seca todavía en forma artesanal, es decir, se seca en el campo durante largos períodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de

producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados, a condiciones adversas y presencia de depredadores (Soria, 2006).

### 2.5.1 Secado Artificial con GLP

Los secadores artificiales son aquellos que utilizan madera, bagazo, GLP y otros derivados del petróleo como combustible. La transferencia de calor se realiza por medio de conducción y convección principalmente. En los secadores artificiales se realiza la convección en forma natural y forzada. Generalmente el proceso de secado se realiza en un recinto cerrado (Soria, 2006). En la siguiente imagen se puede observar el combustible en este caso GLP utilizado durante el proceso de secado aquí en el Ecuador.



Fig.14: Secado artificial de cacao, combustible GLP.

Fuente: Autor



Fig.15: Secado artificial de cacao, combustible diésel.





Fuente: Autor

## 2.5.1 Secado Natural

Desde los inicios de la civilización se han secado productos agrícolas. Originalmente no existía la preocupación por almacenar los productos y disminuir la humedad de los mismos, se realizaba en el campo propiamente dicho. El secado se realizaba de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar, principalmente por la radiación solar incidente en algunas zonas además del viento. Durante el secado natural la acción de los vientos se encarga del movimiento del aire, y la evaporación de la humedad se deriva del potencial de secado del aire y de la influencia directa de la radiación solar. El secado natural, en tendales o en el campo, es un método ampliamente utilizado en América Latina. El proceso comienza poco tiempo después de la fermentación. En los países en desarrollo se explica el uso del secado natural, realizado hasta alcanzar el grado de humedad ideal para el almacenamiento, porque los agricultores, en su mayoría, desconocen las técnicas de secado más modernas. Además, las condiciones climáticas permiten el secado y exigen una inversión mínima. La pérdida de calidad que puede ocurrir cuando se recurre al secado natural en el campo se debe al ataque de insectos, aves y roedores, la contaminación por microorganismos, el desgrane, las fisuras y la ocurrencia de condiciones meteorológicas adversas (Soria,2006).

### 2.5.1.1 Secado natural en tendales

El secado natural en tendales es un procedimiento en el cual el producto se esparce sobre un piso de concreto o de albañilería, con una ligera inclinación para facilitar el drenaje, o incluso sobre el asfalto de las carreteras, en una capa generalmente de 1 cm de espesor. El intercambio de energía y de humedad, entre el aire y el producto, queda limitado casi exclusivamente a la superficie de la capa de producto, por lo que es necesario revolver el grano periódicamente. El viento lleva la humedad perdida por el producto, a la capa de aire ubicada inmediatamente sobre él. Dos factores fundamentales para el secado de productos agrícolas son: la temperatura y la

humedad relativa del aire ambiente, pues el aire posee una capacidad máxima para evaporar humedad. La radiación solar genera energía térmica que provoca el calentamiento de los granos y el movimiento acelerado de la humedad, el flujo se da desde el interior hacia la superficie de los granos, facilitando el secado. El uso tendales para el secado de granos de cacao está muy extendido en nuestro país y alrededor del mundo, por las facilidades que presentan para su construcción y funcionamiento, sin dejar a un lado su bajo costo inicial (Soria, 2006).

### 2.5.1.2 Tendal económico – INIAP

El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) en su publicación —Manual del Cultivo de cacao, muestra un tipo de secador natural. Este tendal se construye con madera o caña, generalmente estas construcciones económicas son de 15 m de largo, 1,8 m de ancho y 0,70 m de altura. El complemento es una cubierta de polietileno negro de 0,04 pulgadas de espesor, sostenida con un caballete de madera, para proteger las almendras de la lluvia. (Soria ,2006)

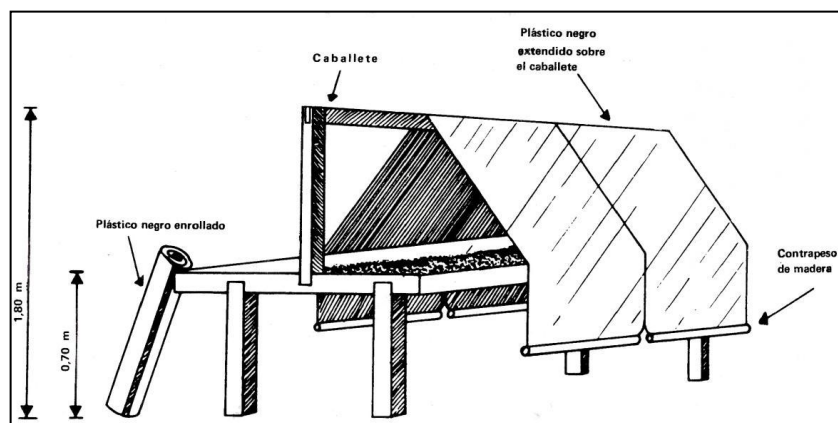


Fig.16: Tendal económico.

Fuente: INIAP

### 2.5.1.3 Tendal rodante

Constituye una estructura movable cuyo objetivo es el secado de los granos de cacao y cuenta con un mecanismo que le permite cubrir al producto en el momento de lluvia.<sup>15</sup>

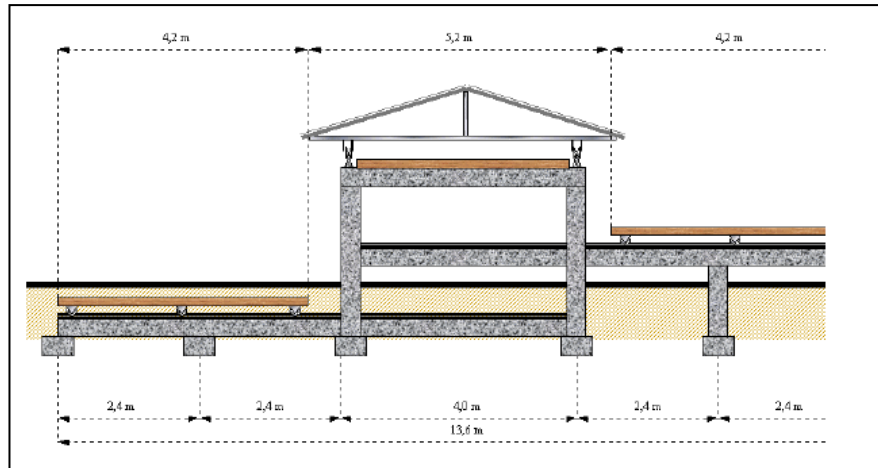


Fig.17: Tendal rodante.

Fuente: ANECACAO

### 2.5.3 Secadores solares inclinados de granos de cacao

En este tipo de secador el colector y la cámara de secado pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño.

Las características generales de operación de los secadores directos son:

<sup>15</sup> Asociación Nacional de Exportadores de Cacao, ANECACAO, 2006. [www.anecacao.com](http://www.anecacao.com)

- El agente de secado puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado (nitrógeno por ejemplo), o vapor de agua sobrecalentado.
- El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre los gases calientes y el sólido mojado, en donde el flujo de gases extrae el líquido vaporizado y separa el vapor.
- Un secador directo consume más combustible por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada a una temperatura de salida constante.

A continuación en la figura se muestra un secador solar directo.



Fig.18: Secador solar directo.

Fuente: *cbi.izt.uam.mx/iph*. Pág. 2

## 2.5.4 La zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalino-terrosos predominantemente de sodio y calcio (Clarke, 1980). Las zeolitas se comportan como una serie de materiales microporosos hidratados, que contienen cationes cambiables de los grupos de los elementos 1A y 2A ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}$  y  $\text{Ca}$ ) y sus estructuras internas permiten que actúen como tamices moleculares que puedan retener y liberar selectivamente las moléculas por adsorción según su tamaño y forma. (Poole C, Prijatama H., 2001). Vezzalini G. (1997) ha valorado esta definición de zeolita frente a



la más reciente propuesta por la International Zeolitic Association (IZA): "una zeolita está caracterizada por una estructura de tetraedros enlazados que contiene cavidades en forma de canales y cajas que comúnmente están ocupadas por moléculas de agua y cationes. En las fases hidratadas ocurre la deshidratación a temperaturas moderadas (fundamentalmente por debajo de 400°C) y ésta es altamente reversible".

Las zeolitas naturales son formadas a partir de la precipitación de fluidos contenidos en los poros, tal como en las ocurrencias hidro-termales, o por la alteración de vidrios volcánicos. Las condiciones de presión, temperatura, actividad de las especies iónicas y presión parcial de agua son factores determinantes en la formación de las diferentes especies de zeolitas. Existen cerca de 40 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo, tan solo algunas especies son ampliamente utilizadas (Jiexiang Y Surent, 1993) Dentro de esas se incluyen: mordenita, clinoptilolita, heulandita, phillipsita, eroinita y chabazita.

La mayoría de las ocurrencias de zeolita puede ser encontrada en uno de los seis ambientes geológicos (Clifont, 1987; Luz, 1994; Mumpton, 1973; Sheppard, 1975): salino o lagos alcalinos, suelos alcalinos, diagenético, sistema abierto, hidrotermal y sedimentos marinos.

Además su uso resulta inocuo para la salud, debido a que mezclando la zeolita con los alimentos animales, estimula el ritmo de crecimiento, mejorando el apetito y la digestión (Kemin, 1995).

En la (Fig. 19), se explica la estructura básica de una zeolita, donde se observan a los átomos de silicio rodeados por 4 átomos de oxígeno; el Al  $3+$  está reemplazando al Si $4+$  creando una deficiencia de cargas positivas o un aumento de cargas negativas que están siendo compensadas por los cationes de intercambio Ca  $2+$ , Mg  $2+$ , K  $+$ , y Na  $+$ , para mantener el equilibrio de la red de la zeolita. También se observa en el interior de la red el agua zeolítica. Los cationes intercambiables pueden desprenderse fácilmente e intercambiarse con cationes selectivos de su entorno.

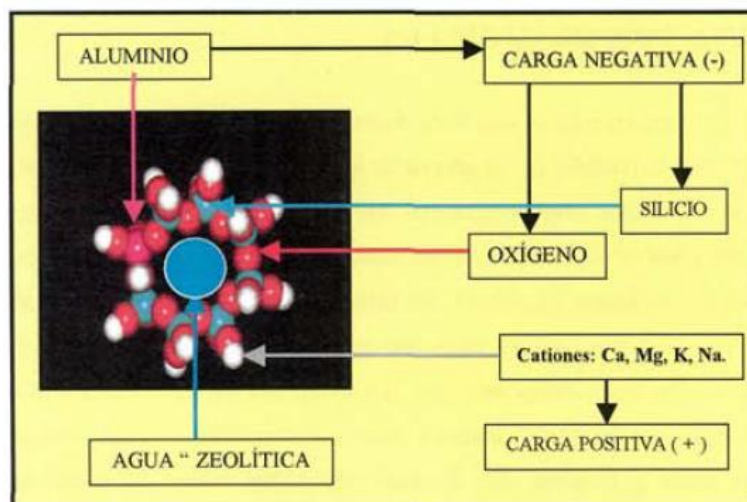


Fig.19: Estructura básica de una zeolita.

Fuente: [www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html](http://www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html). Pág.14

La fórmula general de una zeolita asumida hasta la fecha es:



Donde:

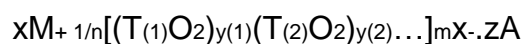
$$0,0 \leq x \leq 0,5z$$

$$0,0 \leq y \leq 0,25z$$

$$0,12 \leq x+2y \leq 0,5z$$

$$0,29 \leq n \leq 1,33z$$

La fórmula química de la celda unitaria de una zeolita según la más reciente definición puede escribirse como:



Donde:

M: catión de valencia n (x>0)

T: T(i), T(2), .... elementos del esqueleto cristalino

A: agua, moléculas diversas, pares iónicos ( $z > 0$ )

y esta fórmula resulta más completa, respondiendo mejor a los conocimientos científicos actuales. (Giannetto G. , Montes A. , Rodríguez Fuentes G., 2000).

Las zeolitas son incoloras a blancas, con densidades que van de 2,0 a 2,3 g/cm (aunque algunas tienen densidades mayores debido a la presencia de Ba y Sr) y dureza 3,5-5.5. En la tabla siguiente se muestra el grupo de las zeolitas naturales. (Mumpton, 1978).

### Familia de la Analcima

- **Analcima** (Aluminio silicato hidratado de sodio)
- **Pollucita** (Aluminio silicato hidratado de sodio y cesio)
- **Wairakita** (Aluminio silicato hidratado de sodio y calcio)
- **Bellbergita** (Aluminio silicato hidratado de sodio, estroncio, bario y potasio)
- **Bikitaita** (Aluminio silicato hidratado de litio)
- **Boggsita** (Aluminio silicato hidratado de sodio y calcio)
- **Brewsterita** (Aluminio silicato hidratado de calcio, sodio, bario y estroncio)



Fig.20: Mineral de analcima.

Fuente: [http:// mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm](http://mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm) .Pág.66

### Familia de la Chabazita

- **Chabazita** ( Aluminio silicato hidratado de calcio)
- **Willhendersonita**(Aluminio silicato hidratado de calcio y potasio)



- **Cowlesita** (Aluminio silicato hidratado de calcio)
- **Dachiardita** (Aluminio silicato hidratado de potasio, sodio y calcio)
- **Edingtonita** (Aluminio silicato hidratado de calcio y bario)
- **Epistilbita** (Aluminio silicato hidratado de calcio)
- **Erionita** (Aluminio silicato hidratado de calcio, potasio y sodio)
- **Faujasita** (Aluminio silicato hidratado de magnesio, calcio y sodio)
- **Ferrierita** (Aluminio silicato hidratado de calcio ,magnesio, potasio y sodio)



Fig.21: Mineral de chabazita.

Fuente: [http:// mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm](http://mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm). Pág.66

### Familia de la Natrolita

- **Mesolita** (Aluminio silicato hidratado de calcio y sodio)
- **Natrolita** (Aluminio silicato hidratado de sodio)
- **Escolecita** (Aluminio silicato hidratado de calcio)
- **Offretita** (Aluminio silicato hidratado de magnesio, potasio y calcio)
- **Paranatrolita** (Aluminio silicato hidratado de sodio)
- **Paulingita**(Aluminio silicato hidratado de bario, sodio, calcio y potasio)
- **Perlialita** (Aluminio silicato hidratado de estroncio, calcio, sodio y potasio)





Fig.22: Mineral de natrolita.

Fuente: [http:// mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm](http://mineralgaleries.com/minerals/silicate/zeolites.htm). Pág.67

### 2.5.4.1 Usos de la zeolita en energía solar

Las zeolitas también podrían hacer contribuciones en el campo de la energía solar. Los esquemas detallados para la utilización de la energía de los rayos del sol son comúnmente estimados por la carencia de la eficiencia de los intercambiadores de calor.

Durante los últimos años, éxitos considerables se han alcanzado en la universidad de Texas y en el Instituto Tecnológico de Massachusetts al usar chabazita y clinoptilolita natural para adsorber y liberar calor de la radiación solar. La deshidratación de la zeolita en el día y su rehidratación en la noche resulta del intercambio de varios cientos de BTU por libra de zeolita, siendo esto suficiente para refrescar los pequeños edificios (Tchemev, 1978). Tchemev estima que una tonelada de zeolita extendida por 200 pie cuadrado de superficie en la azotea producirá una tonelada de aire acondicionado. Las isothermas extremadamente no lineales de la adsorción de zeolitas cristalinas, en contraste con otros materiales adsorbentes, hacen posible refrigerar con una eficiencia de más del 50%. Si la experimentación continuada apoya estos resultados iniciales, las aplicaciones de energía solar pueden crear un mercado para las zeolitas naturales en varios cientos de miles de toneladas cada año. (Mumpton, 1993).

### 2.5.4.2 Secadores solares sin absorbedor de zeolita

Para el caso del secado de granos, el producto puede tratarse mediante captación solar directa e indirecta. En esta última, los dos elementos están separados y el aire es calentado en el colector y la radiación no incidirá sobre el producto colocado en la cámara de secado. Este tipo de secador es esencialmente convectivo y aquí el sol, captado a través de un banco de colectores, actúa como fuente energética. En el secado directo, los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar (Restrepo, 2005).

En estos casos no se ha utilizado un material adsorbente para el proceso de secado, incidiendo solamente la radiación solar sobre la superficie del secador, existen un muchos diseños de secadores solares entre los cuales los más utilizados son:

El secador solar con cubierta parabólica que es una máquina con estructura en la misma forma, que facilita el secado de granos. El sistema básico empleado por este secador es de tipo invernadero, donde como su nombre lo indica, aprovecha este fenómeno para producir una concentración de calor debido al principio físico que involucra. Un secador de este tipo se puede observar en la (Fig.23).



Fig.23: Secador solar con cubierta de plástico.

Fuente: Restrepo, 2005. Pág.130

La (Fig.24) muestra a un secador solar indirecto, aquí el movimiento de aire se realiza por convección forzada, debido a que el tamaño del área de colección no permite

convección natural. El secador es de tipo indirecto, usando una cámara de secado separada, sin acceso para la radiación, lo cual resulta beneficioso en el caso de productos cuya calidad se ve perjudicada por la acción de la radiación, como en el caso del arroz.

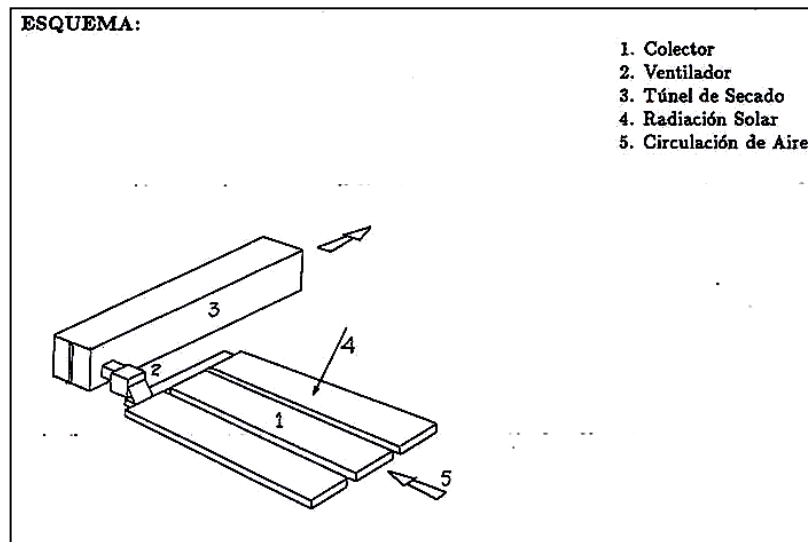


Fig.24: Secador solar indirecto.

Fuente: Restrepo, 2005. Pág.130

### 2.5.4.3 Secadores con absorbedor de zeolita

Debido a las grandes pérdidas que se tiene durante el almacenamiento de granos por respiración y evaporación, así como también por la acción de insectos, roedores, hongos y bacterias es de primordial importancia el mantener el grano a una baja humedad (Orozco,1985)

El uso de zeolita en el proceso de secado ha dado buenos resultados en experiencias realizadas con alimentos como el trigo en donde los resultados mostraron que la zeolita evaporo sobre el 83% de agua de la muestra (Gomez,2012), así mismo experimentos sobre aplicaciones en energía solar se ha demostrado que las zeolitas naturales pueden ser utilizadas con éxito para calefacción y refrigeración solar (Dubinin,1971)



En experiencias en el secado de maíz con el uso de zeolitas se obtuvieron resultados positivos. La humedad obtenida en el maíz fue reducida desde un valor inicial del 26% a un valor final de aproximadamente 16%. (Mcbratney,1989)

### **2.5.5 Importancia del secador solar con absorbedor de zeolita**

Debido a la situación geográfica, el Ecuador recibe un alto potencial de radiación solar, principalmente en las costas. La radiación media está al alrededor de 3-4 kWh/m<sup>2</sup>/día por lo que sería muy útil aprovechar este recurso energético por medio de la implementación de secadores para granos y así aportar con mejoras a las comunas campesinas de nuestro país. (Delgado, 2009)

En la sección anterior se observa que experiencias utilizando zeolitas en secado han dado buenos resultados, sin embargo no han sido muy difundidas ni puestas en práctica; más aún cuando en nuestro medio se podría aprovechar tanto por su ubicación geográfica como por el hecho de que se usa combustible fósil para este proceso.

## **2.6 Conclusiones del capítulo**

Para el secado de productos alimenticios en el Ecuador se ha dado prioridad al uso de combustibles fósiles, principalmente el gas licuado de petróleo, a costa de su precio, esto puede deberse a que las tecnologías en el uso de energía solar se han venido desarrollando en otros ámbitos y no precisamente en procesos de producción.

Al existir una fuerte demanda de algunos productos alimenticios del Ecuador, es importante desarrollar y utilizar los recursos tanto ambientales como tecnológicos para mejorar la eficiencia energética y económica al momento de realizar un proceso.

Conociendo las experiencias en otros países en la utilización de aluminosilicatos o zeolitas para adaptarlas a un sistema combinado de secado con energía solar, se busca evaluar un modelo experimental y estadístico para tratamiento de datos, que brinden como resultado la eficiencia del secado solar.



## CAPITULO III

# PROYECTO DE UN SECADOR SOLAR INCLINADO CON ABSORBEDOR DE ZEOLITA POR CONVECCIÓN NATURAL PARA GRANOS DE CACAO

### 3.1 Introducción

El secado solar es una rama altamente rentable de la explotación de las fuentes renovables de energía, caracterizada por su alto potencial energético, económico, social y ecológico, contribuyendo a la conservación del medio ambiente al evitar emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> y Óxidos de Nitrógeno y azufre, pues sustituye al consumo de electricidad y de combustibles fósiles.(Bergues,2010)

La potencia solar que recibe el planeta Tierra (fuera de la atmósfera) es cerca de  $173 \times 10^{12}$  kW o una energía de  $15 \times 10^{17}$  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  $3 \times 10^{17}$  kWh al año, equivalente a 4000 veces el consumo del mundo entero en un año ( $7 \times 10^{13}$  kWh/año), lo cual nos indica la enorme potencia del Sol (Shyam, 2005).

## 3.2 Secadores por convección natural y forzada

Los dos elementos básicos de una secadora solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar.

El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por dos métodos: circulación forzada y por convección natural.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de “convección forzada” cuando el flujo es causado por medios externos. En cambio, en la “convección libre o natural” el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura del fluido (Incropera, 1999).

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por Convección, la ecuación es:

$$q = h(T_s - T_{\infty}) \quad (3.1)$$

Donde  $q$ , el flujo de calor por convección ( $W/m^2$ ), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido,  $T_s$  y  $T_{\infty}$ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la “ley de enfriamiento de Newton”, y la constante de proporcionalidad “ $h$ ” ( $W/m^2.K$ ) se denomina “coeficiente de transferencia de calor por convección”. Éste depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte.

### Circulación por convección natural:

En la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo



que da lugar a fuerzas ascensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

Ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.<sup>16</sup>

El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0,4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0,1 a 0,3 m/s.

## **Circulación forzada:**

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0,5 y 1 m/s. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

---

<sup>16</sup> (UNRC) Universidad Nacional Río Cuarto.

[http://www.ing.unrc.edu.ar/materias/energia\\_solar/archivos/teoricos/teorico\\_conveccion.pdf](http://www.ing.unrc.edu.ar/materias/energia_solar/archivos/teoricos/teorico_conveccion.pdf)

Tabla 4: Valores de circulación térmica.

Fuente: [www.ing.unrc.edu.ar](http://www.ing.unrc.edu.ar).

| Tipo de convección y fluido   | $h_c$ (W/m <sup>2</sup> °K) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Convección natural, aire      | 5-25                        |
| Convección natural, agua      | 20-100                      |
| Convección forzada, aire      | 10-200                      |
| Convección natural, agua      | 50-10.000                   |
| Agua en ebullición            | 3.000-100.000               |
| Vapor de agua en condensación | 5.000-100.000               |

### 3.3 Secadores solares de granos de cacao por convección natural

En el secado natural el movimiento del aire se lo obtiene por acción del viento y la evaporación de la humedad de la influencia directa de los rayos solares y el potencial de secado del aire.

En los secadores solares para cacao se tiene:

- Secadores solares continuos
- Secadores solares discontinuos

La operación de los secadores continuos se realiza sin interrupción o con intermitencias en intervalos regulares. Los secadores discontinuos son conocidos como secadores por lotes en donde el proceso es intermitente.

Los secadores solares para cacao por convección natural constan de lo siguiente:

- Cámara de acondicionamiento de aire
- Cámara de secado

#### Cámara de acondicionamiento de Aire





Sección en la cual se provee al aire las características adecuadas para el secado, la energía necesaria puede obtenerse en este caso mediante la radiación solar.

### **Cámara de secado**

En donde se realiza propiamente el secado, es el área donde es extraída la cantidad suficiente de agua del producto para su posterior almacenamiento.

#### **Secadores solares directos**

Son el tipo de sencillo de secadero solar. Generalmente se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como frutas, forrajes y hortalizas.

En líneas generales constan de una superficie de secado cubierta por un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El material a secar se extiende en una capa fina sobre un fondo y es expuesto directamente a la radiación solar.

#### **Secaderos solares indirectos**

En este tipo de secadero, la radiación solar no incide directamente sobre el producto a secar. El aire se calienta en un calentador solar y es conducido a la cámara de secado para deshidratar el producto. Generalmente se utilizan como colectores placas solares para calentar el aire en aplicaciones que utilizan baja y moderada temperatura. La eficiencia de estos calentadores depende del diseño y de las condiciones de operación.

En la (Fig.25) aparece el esquema de un secadero de este tipo. El material a secar se coloca sobre bandejas perforadas situadas unas encima de otras. El aire del ambiente se calienta con una placa absorbidora, unido al fondo de la caja y fluye por sí solo al espacio de secado. La operación de los secadores solares es muy simple y no requieren casi nada de mantenimiento. De cualquier manera se recomienda

mantenerlo limpio y seco, para que el calor y la luz puedan ser absorbidos correctamente.<sup>17</sup>

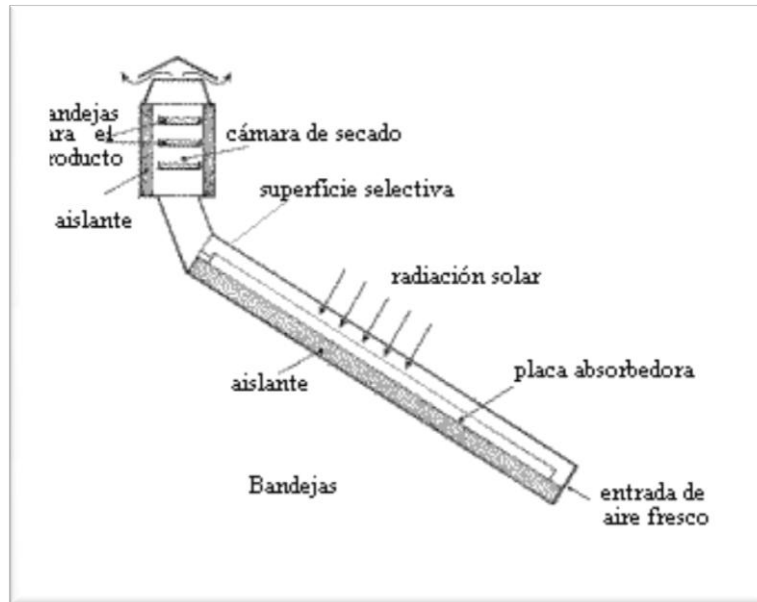


Fig.25: Secador solar indirecto.

Fuente: Saldaña, 2004. Pag 20

### 3.4 Proyecto de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección natural para granos de cacao

En el Ecuador se tienen diferenciadas las poblaciones en donde se puede realizar el cultivo de cacao, algunos de estos lugares tienen problemas en la pos cosecha debido a condiciones climáticas en particular con las actividades durante la fermentación y secado.

En cuanto al tipo de materia tratada, el cacao es un producto con características higroscópicas que necesita un especial cuidado en el tratamiento postcosecha, antes

<sup>17</sup> Ministerio del Ambiente Chile. Secado solar de frutas. [www.fpa.mma.gob.cl](http://www.fpa.mma.gob.cl)

de su almacenamiento y posterior comercialización debe ser tratado de forma que se puedan evitar el deterioro de su calidad.

La correcta fermentación de los granos de cacao es una de las propiedades más importantes a tomar en cuenta antes del secado, que puede ser controlado mediante el contenido de humedad, la coloración característica y por el singular olor que poseen las almendras correctamente fermentadas (Bell, 2003).

El contenido de humedad durante el secado de las almendras de cacao varía entre el 60% al inicio del proceso y el 8% antes del almacenamiento logrando así evitar la proliferación de hongos y la reacción de los compuestos del producto. Además de la humedad que contiene el producto es necesario considerar otras características que serán expuestas a continuación (Bell, 2003)

$$\rho_c = 520 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$C_p = 1728 \frac{\text{J}}{\text{Kg.K}}$$

$$K = 0,18 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$$

$$\alpha = 2,00278 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Donde:

$\rho_c$ : Densidad del cacao [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$C_p$ : Calor específico [ $\text{J}/\text{Kg.K}$ ]

$K$ : Coeficiente de conductividad térmica [ $\text{W}/\text{m.K}$ ]

$\alpha$ : Difusividad térmica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

### 3.4.1 Isoterma de sorción

La isoterma de sorción describe la relación entre la humedad relativa del aire de secado y la humedad de equilibrio del producto a secar, para lo cual se aplica la ecuación de Halsey como la más adecuada (Bell, 2003). La (Fig.5) muestra las constantes de equilibrio para la construcción de la isoterma según la (Ec.3.2).

La (Fig.26) muestra la isoterma de sorción para cacao usando la ecuación de Halsey en donde se observa la relación entre humedad relativa del ambiente, y humedad de equilibrio del producto.

$$\text{Modified Halsey} \quad rh = \exp \left| \frac{-\exp (A + BT)}{m^c} \right| \quad (3.2)$$

Donde:

$rh$  = Humedad relativa %,  $T$  = Temperatura °C,  $m$  = Contenido de humedad %

Tabla 5: Constantes de equilibrio, Ecuaciones de humedades relativas.

Fuente: Bell, 2003

| Producto | Ecuación de mejor ajuste | A                       | B        | C       |
|----------|--------------------------|-------------------------|----------|---------|
| Cacao    | Halsey                   | 4,218                   | -0,00904 | 2,469   |
| Café     | Oswin                    | 11,340                  | -0,07143 | 2,4421  |
| Cilantro | Chung-Pfost              | 326,61                  | 0,19323  | 56,4078 |
| Hinojo   | Oswin                    | 7,3354                  | -0,05051 | 1,5651  |
| Arroz    | Henderson                | $1,9187 \times 10^{-5}$ | 2,4451   | 51,161  |
| Nuez     | Chung-Pfost              | 831,2                   | 0,06391  | 104,86  |
| Orejones | Henderson*               | -0,0701                 | 0,8661   | 0,0     |

\* No incluye temperatura

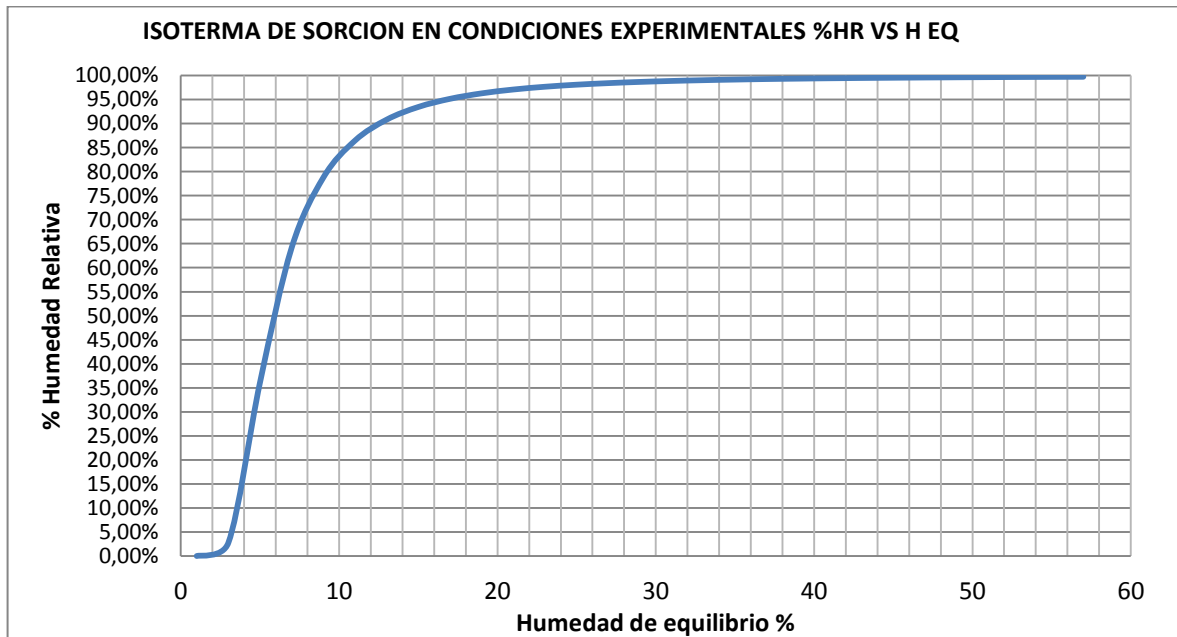


Fig.26: Isoterma de sorción de cacao.

Fuente: Velásquez, 2008. Pág.59

### 3.5.1 Diseño del Secador

#### 3.4.2.1 General

La capacidad de este prototipo se ha calculado en base a lo establecido por (Barbosa, 2000) según la ecuación:

$$\frac{M_s}{A_c} = \rho_c Z_c \quad (3.3)$$

De donde:

$M_s$  Masa del sólido kg

$A_c$  Area de secado  $m^2$

$\rho_c$  Densidad del cacao  $kg/m^3$

$Z_c$  Altura de la cama se secado m

Para el caso de secar 50 kg de cacao por ejemplo, con una altura de cama de 0,05 m, el área de secado es 1,92 m<sup>2</sup>, sin embargo debido a motivos constructivos el equipo se ha diseñado con un área de secado de 2 m<sup>2</sup>.

La altura total de la pared es de 0,26 m, de los cuales 0,05 m ocupa la zeolita como doble fondo y 0,21 m constituye la zona de apilamiento del producto ver (Fig.32). Para crear un efecto invernadero se coloca en la cubierta una placa de policarbonato de 2m<sup>2</sup> que ayuda a proteger al producto de posibles precipitaciones. La cubierta de 125 micras de espesor, está fijada mediante una rejilla movable a la superficie del secador.

La estructura del secador solar tiene una altura al piso de 1,40 m en la parte posterior y 1,30 m en la parte anterior con una inclinación del 5%. La (Fig.27) ilustra en detalle los componentes del secador solar inclinado.

Las paredes y la zona de apilamiento del secador están construidas en madera debido a razones de costos como durabilidad del secador, además de facilitar el manejo del producto.

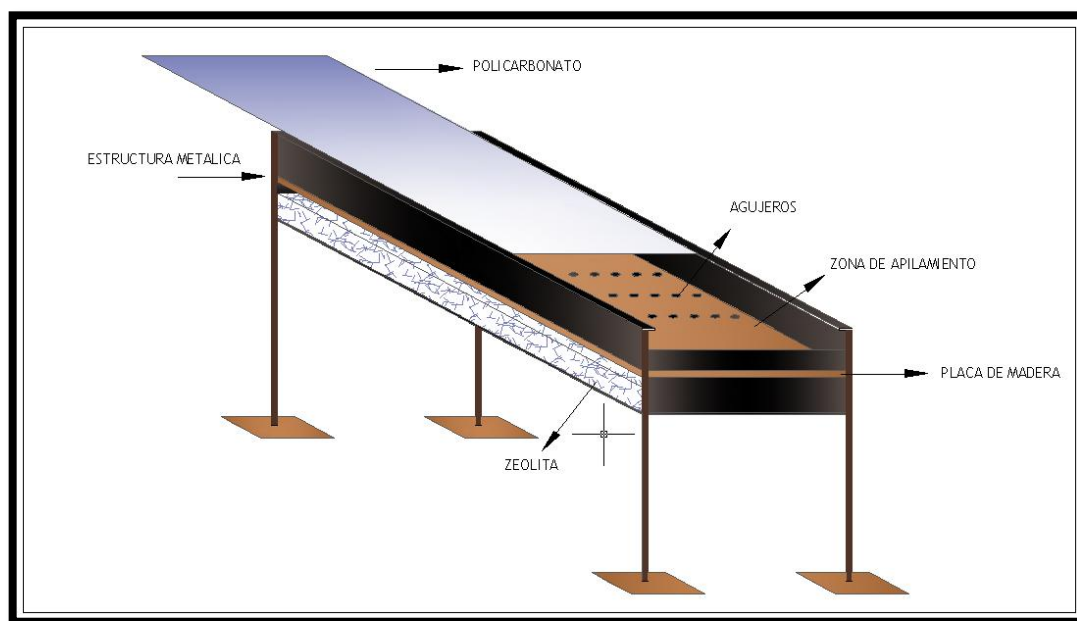


Fig.27: Secador solar inclinado con zeolita.

Fuente: Autor

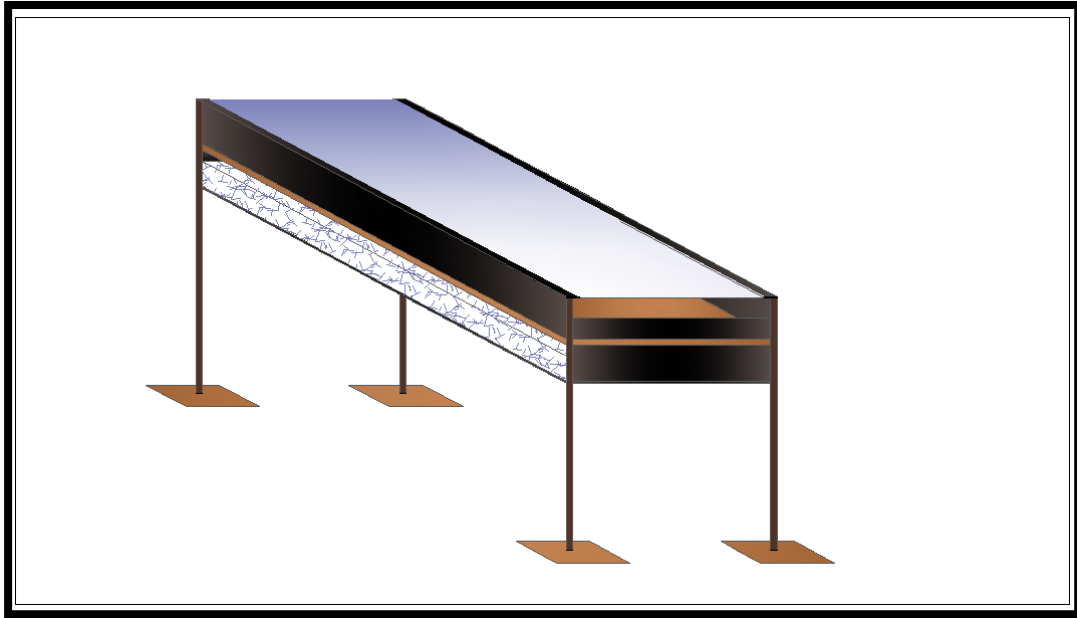


Fig.28: Secador solar inclinado.

Fuente: Autor

El proyecto tecnológico del secador esta implementado sobre Autocad 2010. Este software permite la construcción del secador por los usuarios interesados en el mismo. El proyecto contiene la vista general, así como las partes componentes del secador y los detalles tecnológicos del ensamblaje del mismo.

### 3.4.2.2 Detalles Constructivos

#### 3.4.2.2.1 Policarbonato

El policarbonato es un grupo de termoplásticos fácil de trabajar, moldear y termoformar, y son utilizados ampliamente en la manufactura moderna. El nombre "policarbonato" se basa en que se trata de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular para el proyecto se utilizará una dimensión de  $2\text{m}^2$  de este material.

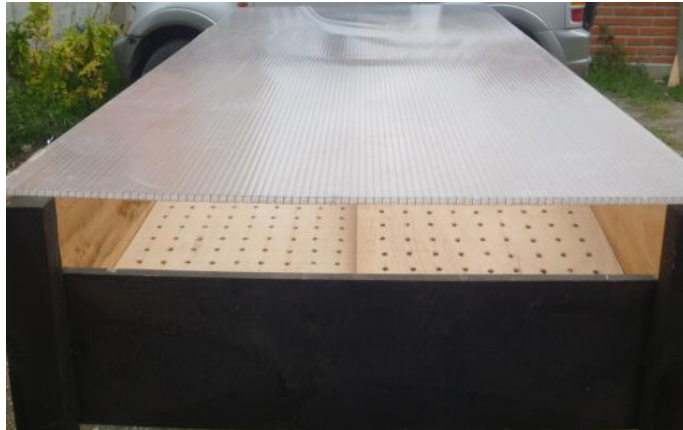


Fig.29: Placa de Policarbonato.

Fuente: Autor

Propiedades generales del policarbonato<sup>18</sup>

Densidad: 1,20 g/cm<sup>3</sup>

Rango de temperatura de uso: -100 °C a +135 °C

Punto de fusión: apróx. 250 °C

Índice de refracción: 1,585 ± 0,001

Índice de transmisión lumínica: 90% ± 1%

Característica de incombustibilidad

Propiedades Eléctricas

Constante dieléctrica a 1 MHz 2,9

Factor de Disipación a 1 MHz 0,01

Resistencia Dieléctrica 15 - 67 kV/mm

Resistividad Superficial 10<sup>15</sup> Ω·m

Resistividad de Volumen 10<sup>14</sup> - 10<sup>16</sup> Ω/cm<sup>3</sup>

Propiedades Físicas

Absorción de Agua - Equilibrio 0,35 %

<sup>18</sup> Tomado de [www.wikipedia.org/wiki/policarbonato](http://www.wikipedia.org/wiki/policarbonato), 10/10/2012





Absorción de Agua - en 24 horas 0,1 %

Densidad 1,20 g/cm<sup>3</sup>

Índice de refracción 1,584 - 1,586

Índice de Oxígeno Límite 5 - 27 %

Inflamabilidad V0-V2

Número Abbe 34,0

Resistencia a los Ultra-violetas Aceptable

Propiedades Térmicas

Calor Específico: aprox. 1200 J/(K·kg)

Coefficiente de Expansión Térmica:  $65 \times 10^{-6}$  -  $70 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>

Conductividad Térmica a 23 °C: 0,19-0,22 W/(m·K)

Temperatura Máxima de Utilización: 115 - 130 °C

Temperatura Mínima de Utilización: -135 °C

Temperatura de Deflexión en Caliente - 0,45 MPa: 140 °C

Temperatura de Deflexión en Caliente - 1,8 MPa: 128 - 138 °C

### **3.4.2.2.2 Placa de Madera**

Se ha utilizado una placa de madera de 6 mm de espesor, y de 2 m<sup>2</sup> de área, la cual ha sido perforada con una broca de 1cm de diámetro y con una distancia entre ejes de la circunferencia de 5 cm, estas perforaciones tienen por objeto realizar el intercambio de masa entre la zeolita y el material a secar, la ilustración siguiente muestra el detalle de la placa de madera.

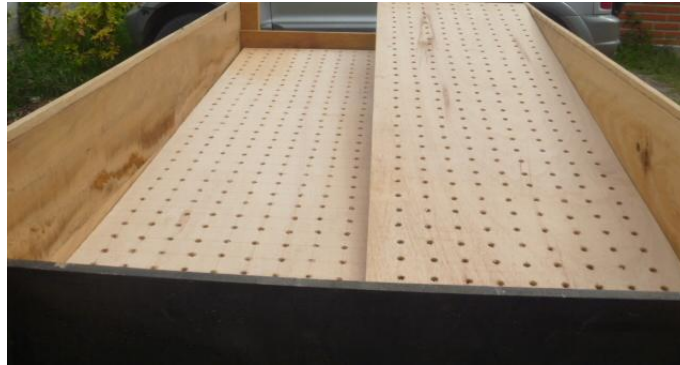


Fig.30: Placa de Madera.

Fuente: Autor

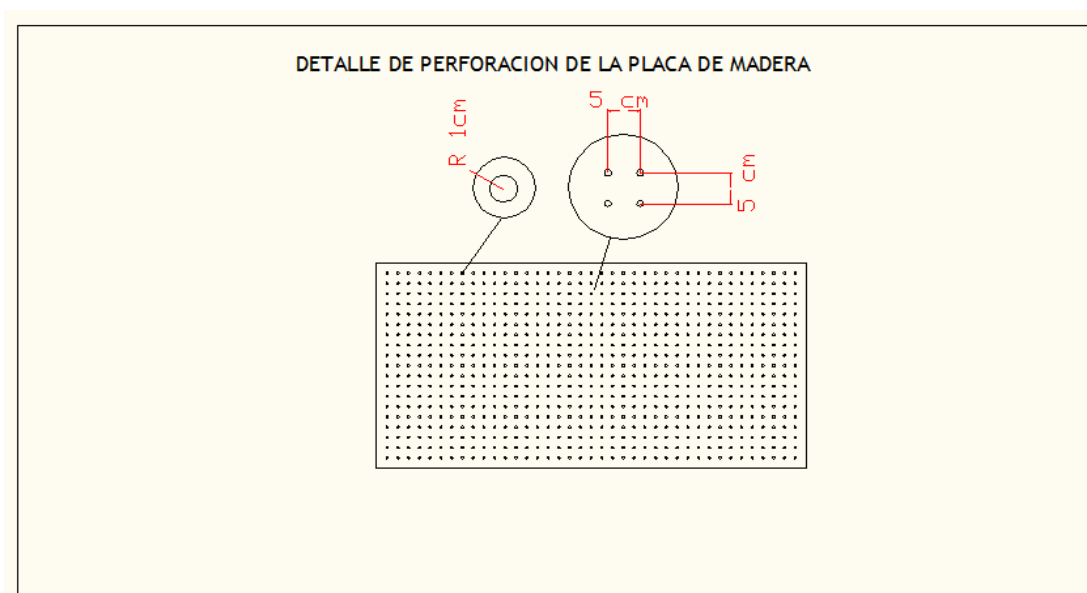


Fig.31: Detalle de perforación para la placa de madera.

Fuente: Autor

### 3.4.2.2.3 Estructura

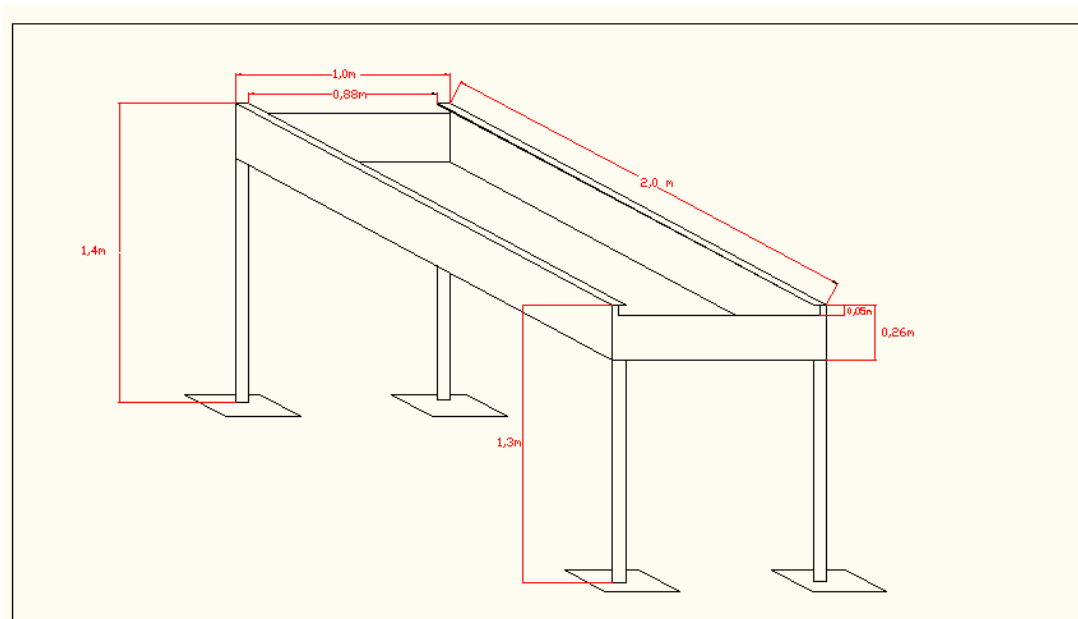


Fig.32: Estructura del secador solar inclinado.

Fuente: Autor

La estructura del soporte del secador solar inclinado, como se observa en la figura anterior consta de cuatro ángulos de metal que conforman las bases con dimensiones distintas, las dos bases posteriores tienen una altura de 1,4 m y las delanteras 1,3 m, dando un 5% de inclinación o  $2,86^\circ$ , la longitud total es de 2 m y el ancho es de 1m, posee un doble fondo de 0,05 m en donde es colocada la zeolita, y 0,21 m en donde se coloca el material a secarse.

En la parte superficial consta de una rejilla de 125 micras de espesor, por donde corre la placa de policarbonato al momento de abrir y cerrar el secador.

La zeolita es colocada en un volumen de  $0,1 \text{ m}^3$  lo cual representa una cantidad aproximada de 24 kg repartida en 2 porciones de 12 kg para el caso de estudio ver (Fig. 84).

### 3.5 Conclusiones del capítulo



Integrando todos y cada uno de los elementos básicos y necesarios para el proceso de secado solar como los valores a ser considerados al momento de realizar el proceso, se ha diseñado el equipo a escala piloto el cual pretende ser un modelo para reproducirlo a escala mayor, tomando en consideración parámetros como por ejemplo humedad inicial y final del producto 60% - 8% ( Bell, 2003), y utilizando la isoterma de sorción que es presentada mediante la ecuación de Halsey, se tienen bases para el respectivo diseño del experimento el cual se lo hará en el capítulo posterior.

Por otro lado el detalle sobre los materiales así como la forma y disposición de los mismos son de diseño propio, el cual está sujeto a experimentación tomando siempre en cuenta las condiciones externas como son radiación solar incidente, humedad relativa del aire etcétera.

Según lo establecido por Sánchez (2011) un captador solar ubicado en el hemisferio norte recibirá una mayor irradiación si se encuentra orientado en dirección hacia el sur y viceversa; además, si el mismo captador tiene una inclinación igual a la latitud del lugar, podrá permanecer mucho más tiempo en posición perpendicular a la radiación solar; aumentando la energía captada por el mismo. De esto se concluye la importancia de la orientación e inclinación del secador solar.

Finalmente algunos de estos parámetros teóricos hasta el momento descritos, pueden sufrir modificaciones posteriores dependiendo de los factores externos, los cuales serán estudiados y modelados para obtener la mejor eficiencia dentro del proceso de secado solar inclinado.



## CAPITULO IV

# EVALUACIÓN DE UN SECADOR SOLAR INCLINADO CON ABSORBEDOR DE ZEOLITA POR CONVECCIÓN NATURAL PARA GRANOS DE CACAO

### 4.1 Introducción

Este capítulo trata sobre la eficiencia que se consigue experimentalmente en el secador, en cuanto a su diseño y variables propuestas, así también realiza una comparación con el secado solar tradicional.

La eficiencia de secado es el parámetro más importante que se busca en este estudio, que corrobore la hipótesis de que el secador solar inclinado con absorbedor de zeolita resulta más eficiente que el secado tradicional, ahora bien, al hablar de eficiencia debemos hacer una distinción ¿a qué eficiencia nos estamos refiriendo?.

Si bien es cierto la eficiencia térmica aparentemente sería la más importante por cuanto nos indica el tiempo en el cual nuestro producto alcanzará la humedad de equilibrio en razón a la velocidad de secado, sin embargo no es menos importante el factor económico que implicaría construir el equipo a gran escala, por lo que la eficiencia térmica como económica deben ir de la mano para que este proyecto sea factible, no hay que olvidar que se debe involucrar a pequeños productores que en su mayoría no poseen grandes recursos económicos.

Con todos los parámetros y variables propuestas para la evaluación se analizan los resultados estadísticamente mediante el programa computacional statgraphics el cual permite verificar el modelo que se ajusta más al secado solar, así como determinar con qué condiciones se obtiene la mayor eficiencia.

## 4.2 Evaluación del secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección natural para granos de cacao CCN-51

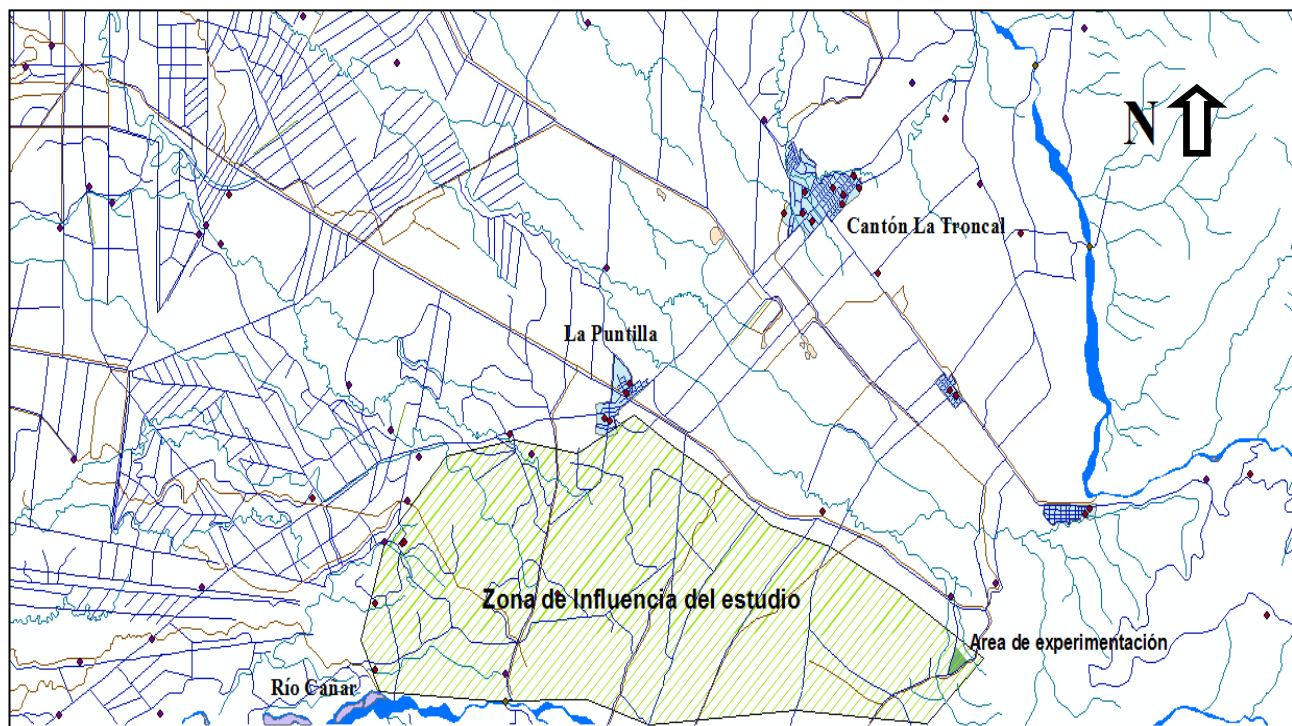
Para evaluar la eficiencia del secado solar en el caso de estudio, es importante tener en cuenta las condiciones en las cuales se va a trabajar, así como el entorno del lugar, para el caso se ha elegido el cantón La Troncal perteneciente a la provincia de Cañar el sur del Ecuador, en donde se desarrollará el experimento.

### 4.2.1 Ubicación del área de estudio

El estudio se desarrolla en la finca Pomelos perteneciente al cantón La Troncal en el sistema de referencia UTM de 687013 Este ,9724349 Norte, Datum: WGS84, Zona 17 Sur, Altitud 162 msnm, latitud sur 2°30'05"; longitud oeste 79°31'45" la (Fig.33) muestra en detalle la ubicación del área de experimentación así como la zona de influencia dentro del cantón La Troncal.

Fig.33: Área de influencia de cultivos de cacao en el cantón La troncal.

Fuente: Autor basada en cartografía del IGM<sup>19</sup>



<sup>19</sup> IGM ( Instituto Geográfico militar)

## 4.2.2 Condiciones climatológicas del área de estudio

Para el estudio se toman los datos históricos del INAMHI, en la estación M176 ubicada en el cantón Naranjal, estos datos meteorológicos se los considera incidentes para el cantón La Troncal por encontrarse próximo y dentro del área de influencia de estudio. La Tabla 6 muestra el registro histórico de variables meteorológicas obtenido en la estación M176 del cantón Naranjal.

Tabla 6: Variables meteorológicas.

Fuente: INAMHI, 2008<sup>20</sup>

| M176        |            | NARANJAL                              |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  | INAMHI            |         |           |                                  |       |     |
|-------------|------------|---------------------------------------|-----|-------------|-----|--------|--------|----------------------|-----|--------|-----|----------------|------------------|-------------------|---------|-----------|----------------------------------|-------|-----|
| MES         | HELIOFANIA | TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C) |     |             |     |        |        | HUMEDAD RELATIVA (%) |     |        |     | PUNTO DE ROCIO | TENSION DE VAPOR | PRECIPITACION(mm) |         |           | Número de días con precipitación |       |     |
|             | (Horas)    | ABSOLUTAS                             |     | M E D I A S |     |        |        | Máxima               | día | Minima | día | Media          | °C)              | (hPa)             | Suma    | Máxima en |                                  |       |     |
|             |            | Máxima                                | día | Minima      | día | Máxima | Minima |                      |     |        |     |                |                  |                   | Mensual | Mensual   |                                  | 24hrs | día |
| ENERO       |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| FEBRERO     |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| MARZO       |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| ABRIL       |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| MAYO        |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| JUNIO       |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| JULIO       |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| AGOSTO      |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| SEPTIEMBRE  |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| OCTUBRE     |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |
| NOVIEMBRE   |            |                                       |     |             |     | 28.7   | 20.4   | 24.5                 |     |        |     | 89             | 22.6             | 27.6              | 5.0     |           |                                  |       |     |
| DICIEMBRE   |            | 33.2                                  | 9   | 20.2        | 5   | 30.8   | 21.6   | 25.9                 | 98  | 7      | 70  | 6              | 87               | 23.5              | 29.1    | 2.2       | 1.2                              | 26    | 3   |
| VALOR ANUAL |            |                                       |     |             |     |        |        |                      |     |        |     |                |                  |                   |         |           |                                  |       |     |

<sup>20</sup> Anuario meteorológico 2008 del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI

| MES         | EVAPORACION (mm) |              | NUBOSIDAD<br>MEDIA<br>(Octas) | VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    | Vel.Mayor<br>Observada |     | VELOCIDAD<br>MEDIA<br>(Km/h) |
|-------------|------------------|--------------|-------------------------------|---|---|-------|---|-------|----|-------|---|-------|---|-------|----|-------|---|-------|----|------------------------|-----|------------------------------|
|             | Suma             | Máxima en    |                               | N                                       |   | NE    |   | E     |    | SE    |   | S     |   | SW    |    | W     |   | NW    |    | CALMA                  | Nro |                              |
|             | Mensual          | 24hrs<br>día |                               | (m/s)                                   | % | (m/s) | % | (m/s) | %  | (m/s) | % | (m/s) | % | (m/s) | %  | (m/s) | % | (m/s) | %  | %                      | OBS |                              |
| ENERO       |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| FEBRERO     |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| MARZO       |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| ABRIL       |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| MAYO        |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| JUNIO       |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| JULIO       |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| AGOSTO      |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| SEPTIEMBRE  |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| OCTUBRE     |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| NOVIEMBRE   |                  |              | 6                             |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |
| DICIEMBRE   |                  |              | 6                             | 0.0                                     | 0 | 2.8   | 5 | 3.8   | 10 | 3.3   | 9 | 0.0   | 0 | 3.6   | 32 | 2.8   | 5 | 3.0   | 19 | 19                     | 93  | 6.0 NW                       |
| VALOR ANUAL |                  |              |                               |   |   |       |   |       |    |       |   |       |   |       |    |       |   |       |    |                        |     |                              |

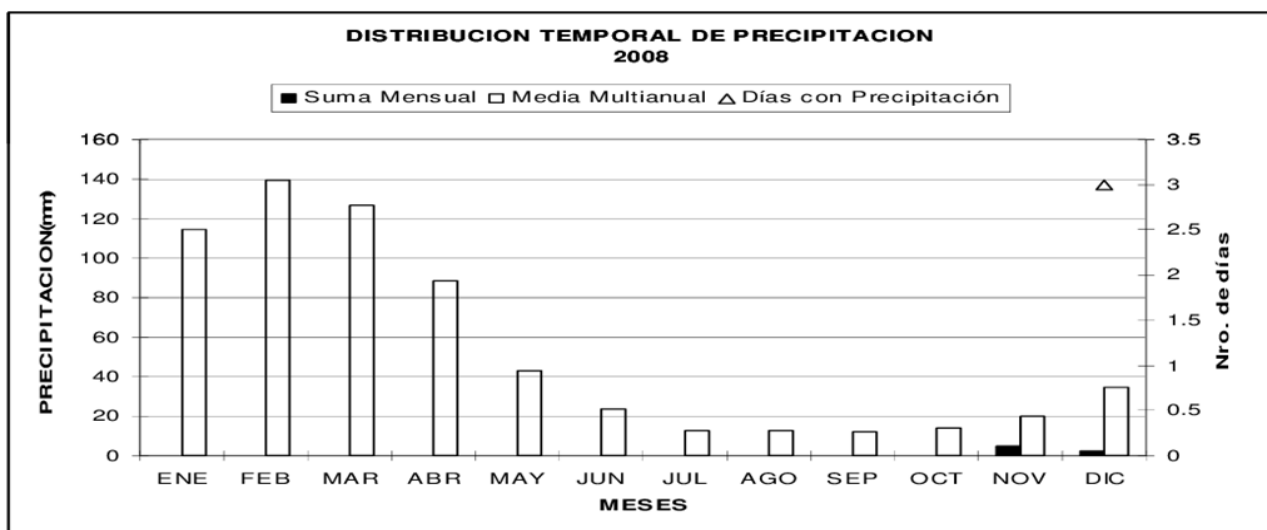


Fig.34: Precipitaciones mensuales para Naranjal.

Fuente: INAMHI, 2008



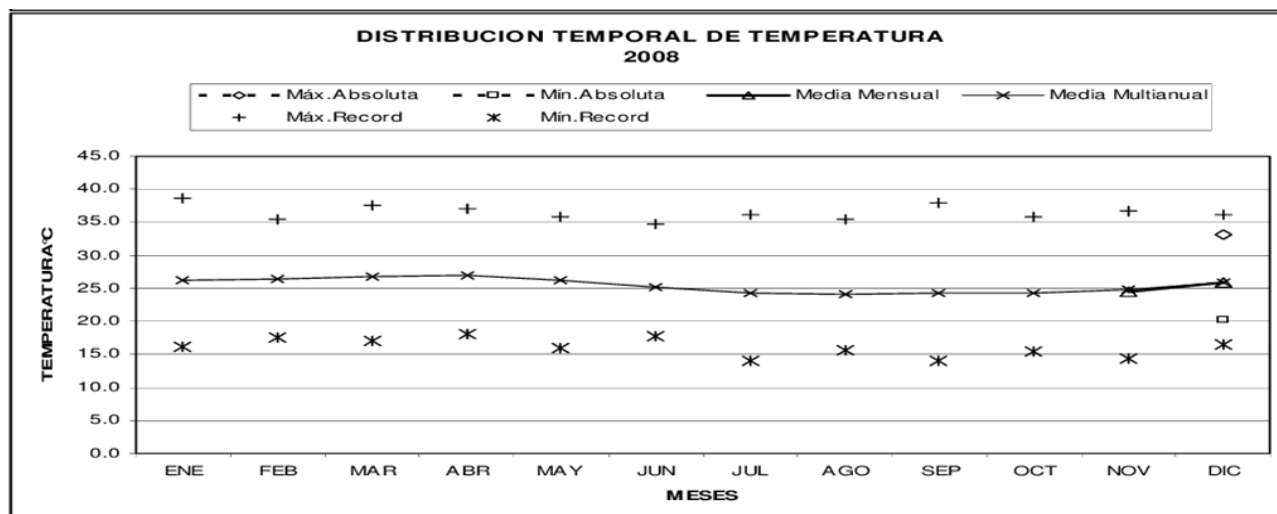


Fig.35: Temperaturas promedio mensuales para Naranjal.

Fuente: INAMHI, 2008

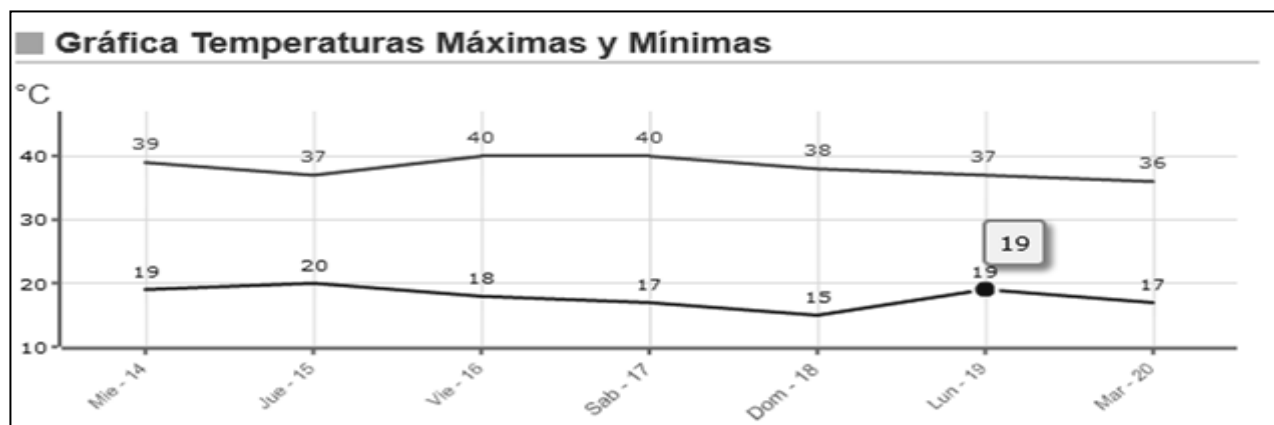


Fig.36: Temperaturas promedio Noviembre 2012 del cantón La Troncal.

Fuente: [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec), 20/11/2012

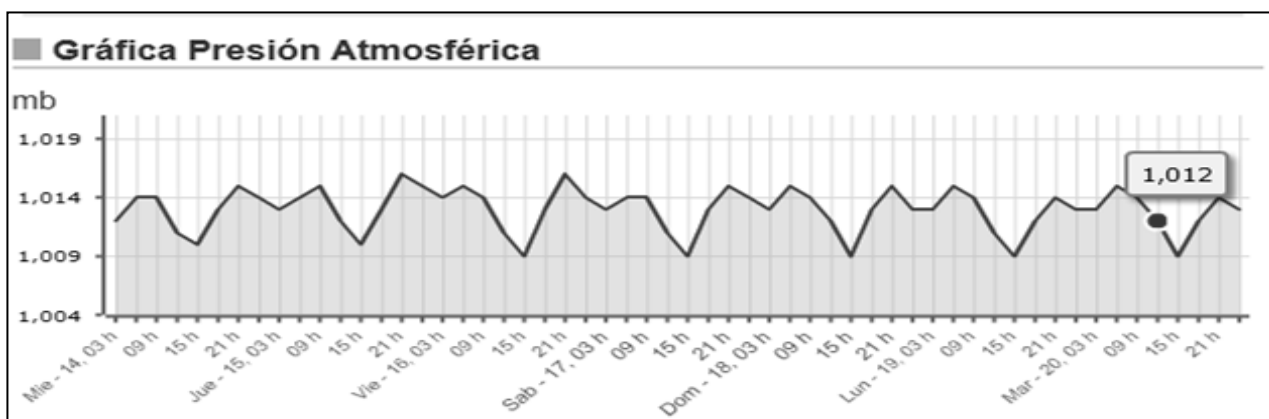


Fig.37: Presión atmosférica promedio Noviembre 2012 del cantón La Troncal.

Fuente: [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec), 20/11/2012

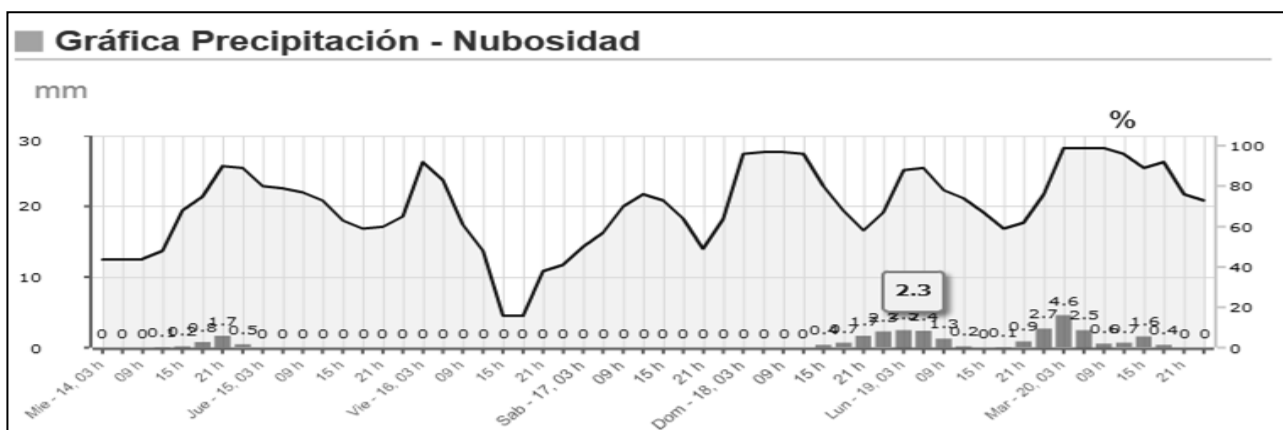


Fig.38: Precipitación-nubosidad Noviembre 2012 del cantón La Troncal.

Fuente: [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec), 20/11/2012

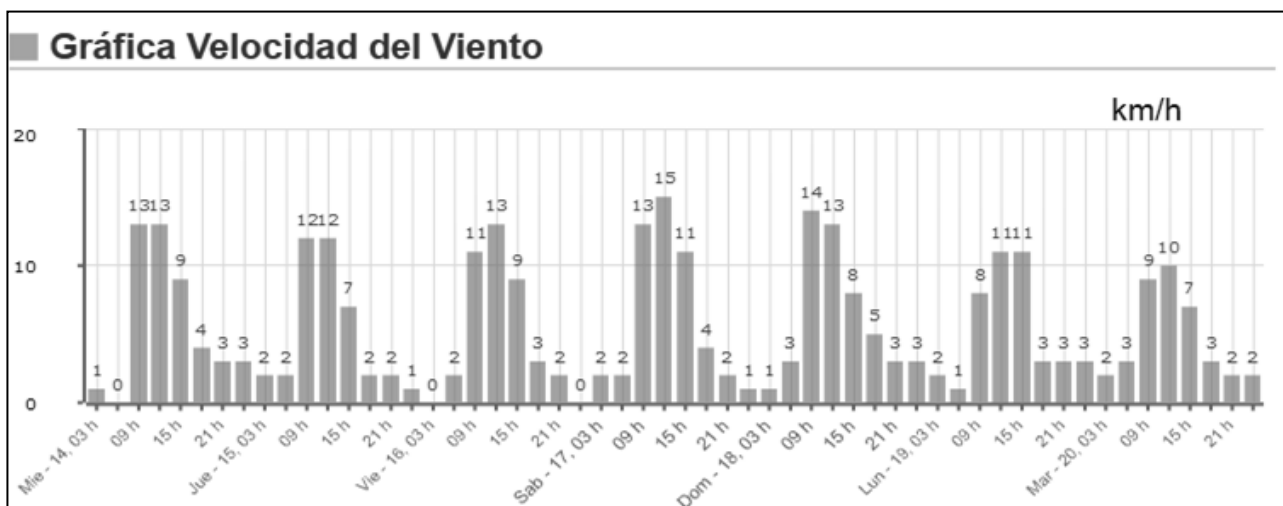


Fig.39: Velocidad del viento Noviembre 2012 del cantón La Troncal.

Fuente: [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec), 20/11/2012

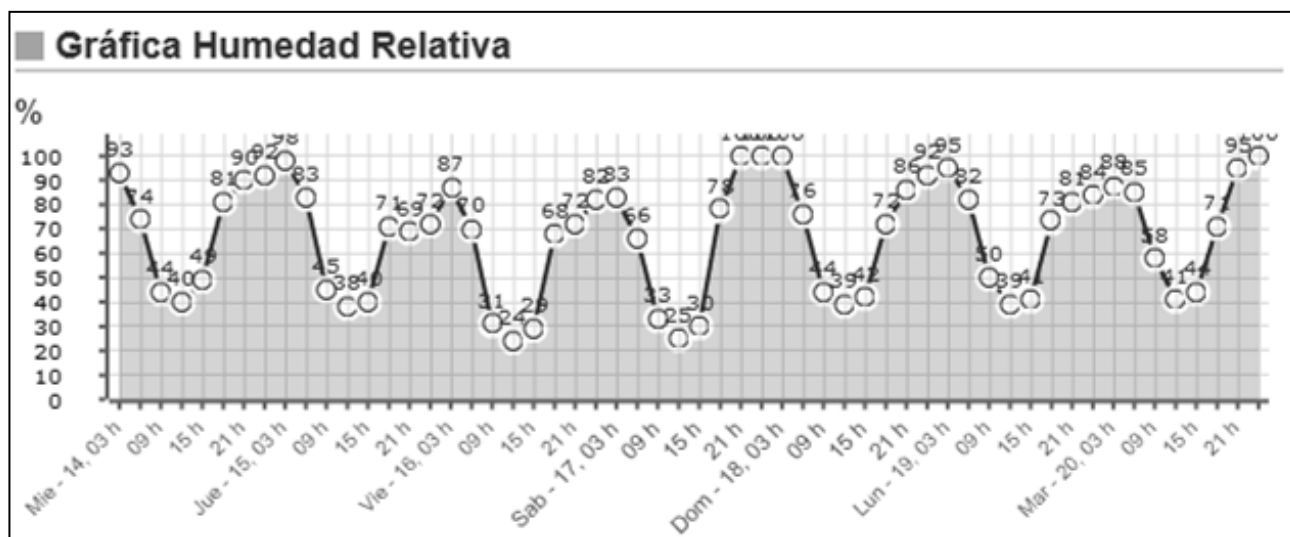


Fig.40: Humedad relativa Noviembre 2012 del cantón La Troncal.

Fuente: [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec), 20/11/2012

El Ecuador al estar ubicado sobre el centro de la tierra, tiene un potencial solar que sin ser el mejor del planeta, se sitúa en niveles muy convenientes para el aprovechamiento energético. Los datos de radiación solar en el país presentan homogeneidad de los valores a lo largo del año.<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Inventario de Recursos Energéticos del Ecuador con fines de generación eléctrica 2009. CONELEC

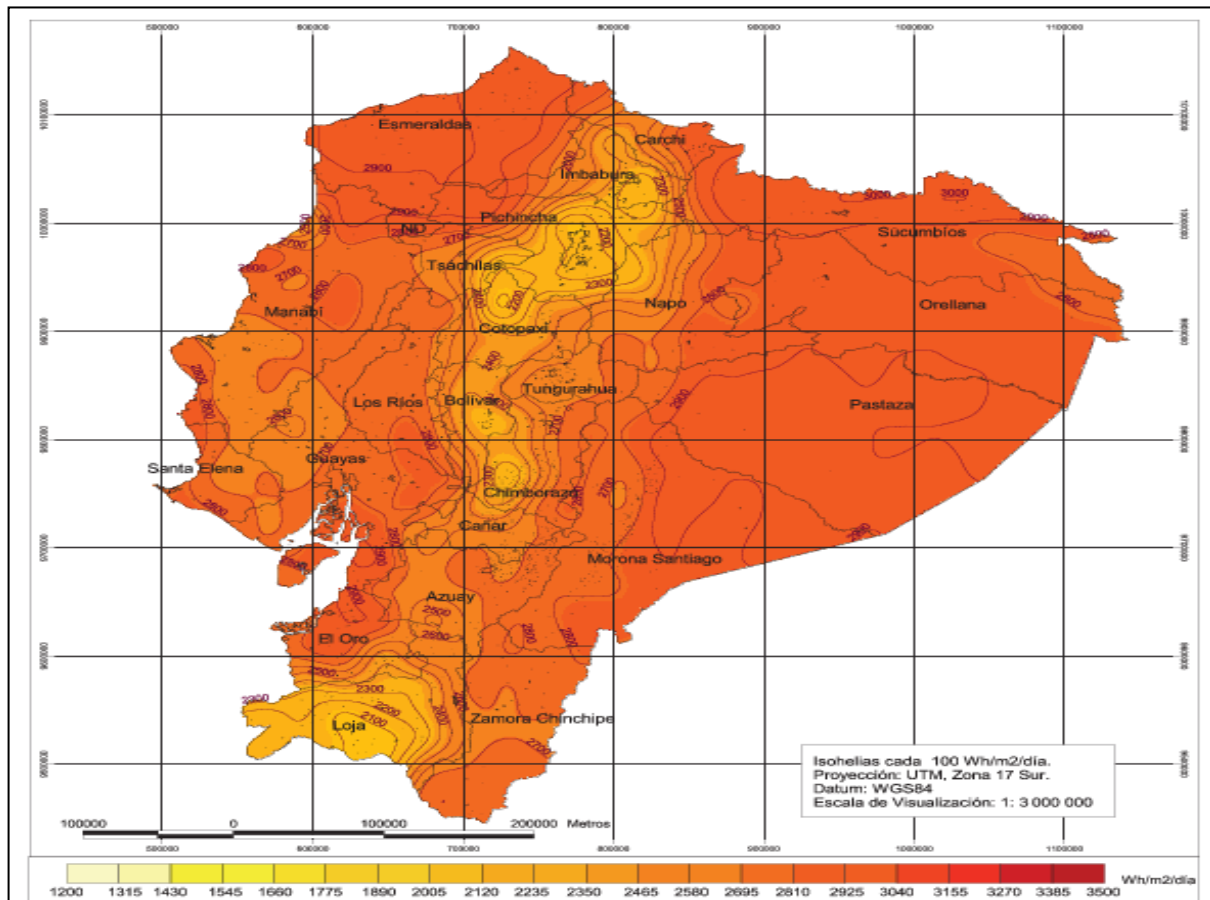


Fig.41: Promedio de radiación difusa  $\text{Wh/m}^2/\text{día}$ .

Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC, 22/11/2012. Pág.47

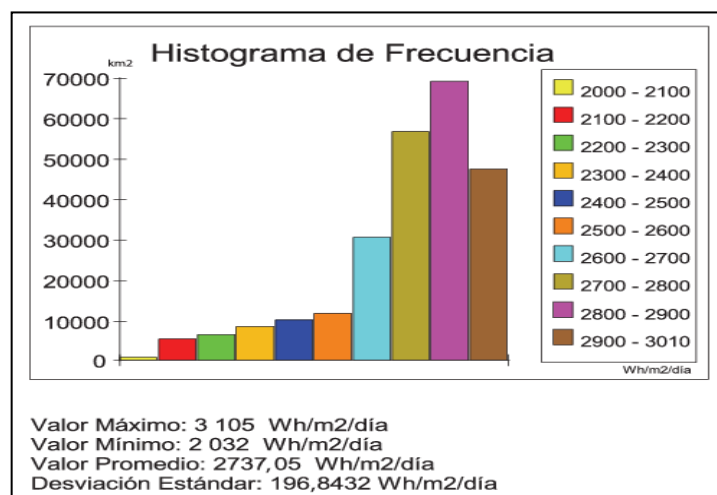


Fig.42: Histograma de frecuencia  $\text{Wh/m}^2/\text{día}$ .

Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC, 22/11/2012. Pág.47

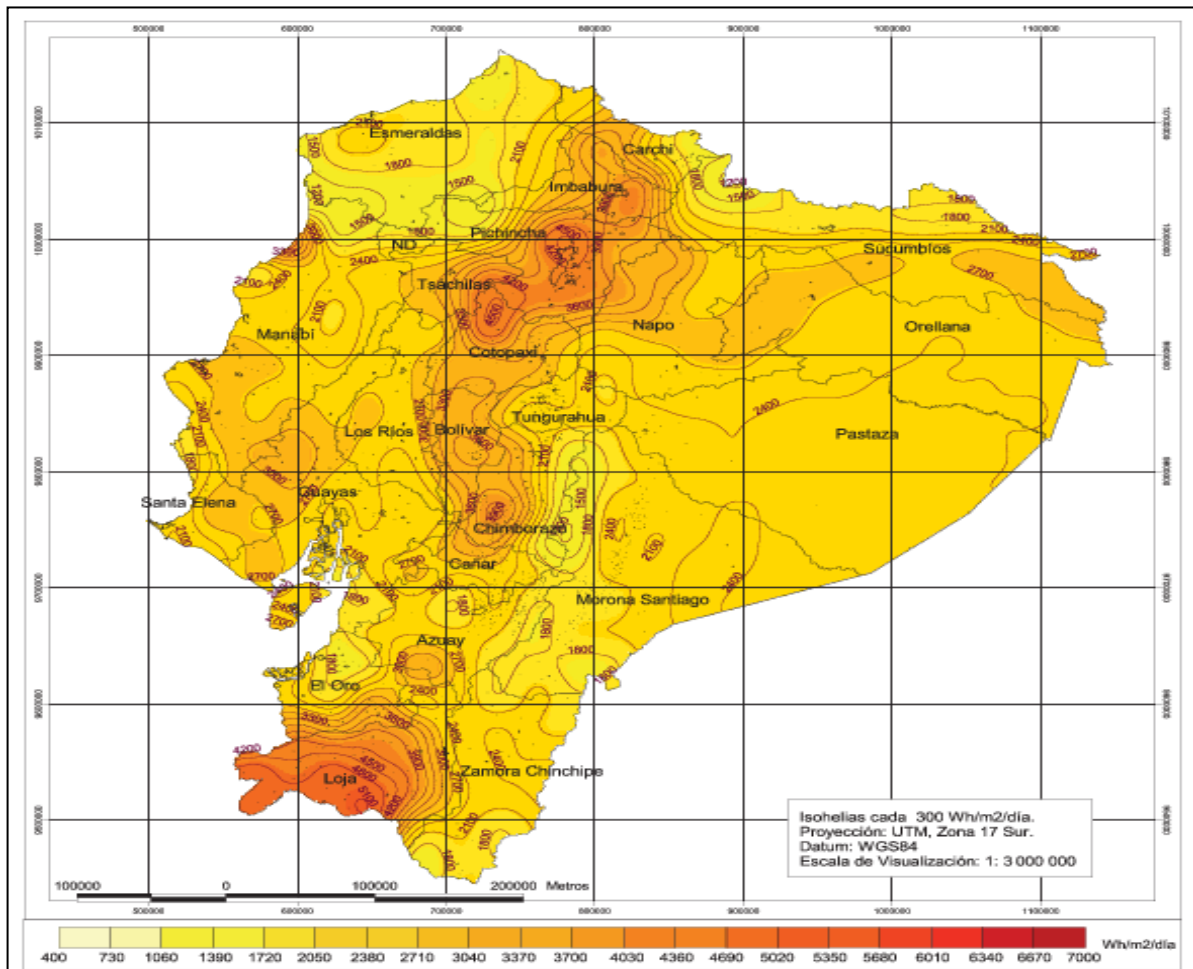


Fig.43: Promedio de radiación directa Wh/m<sup>2</sup>/día.

Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC, 22/11/2012.Pág.48

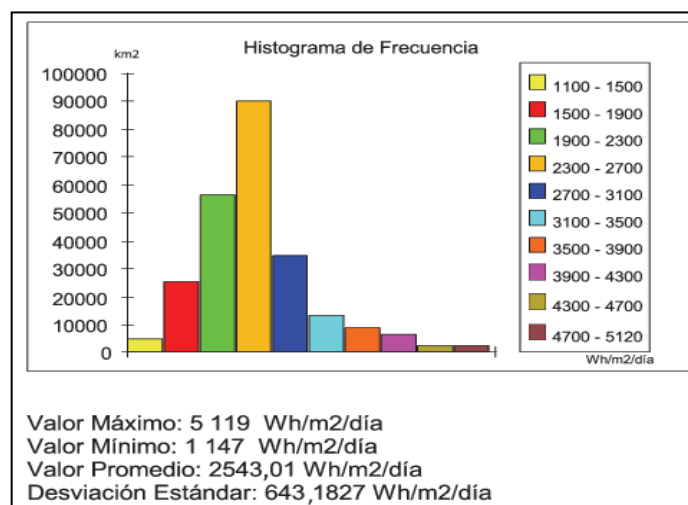


Fig.44: Histograma de frecuencia Wh/m<sup>2</sup>/día.

Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC, 22/11/2012. Pág.48

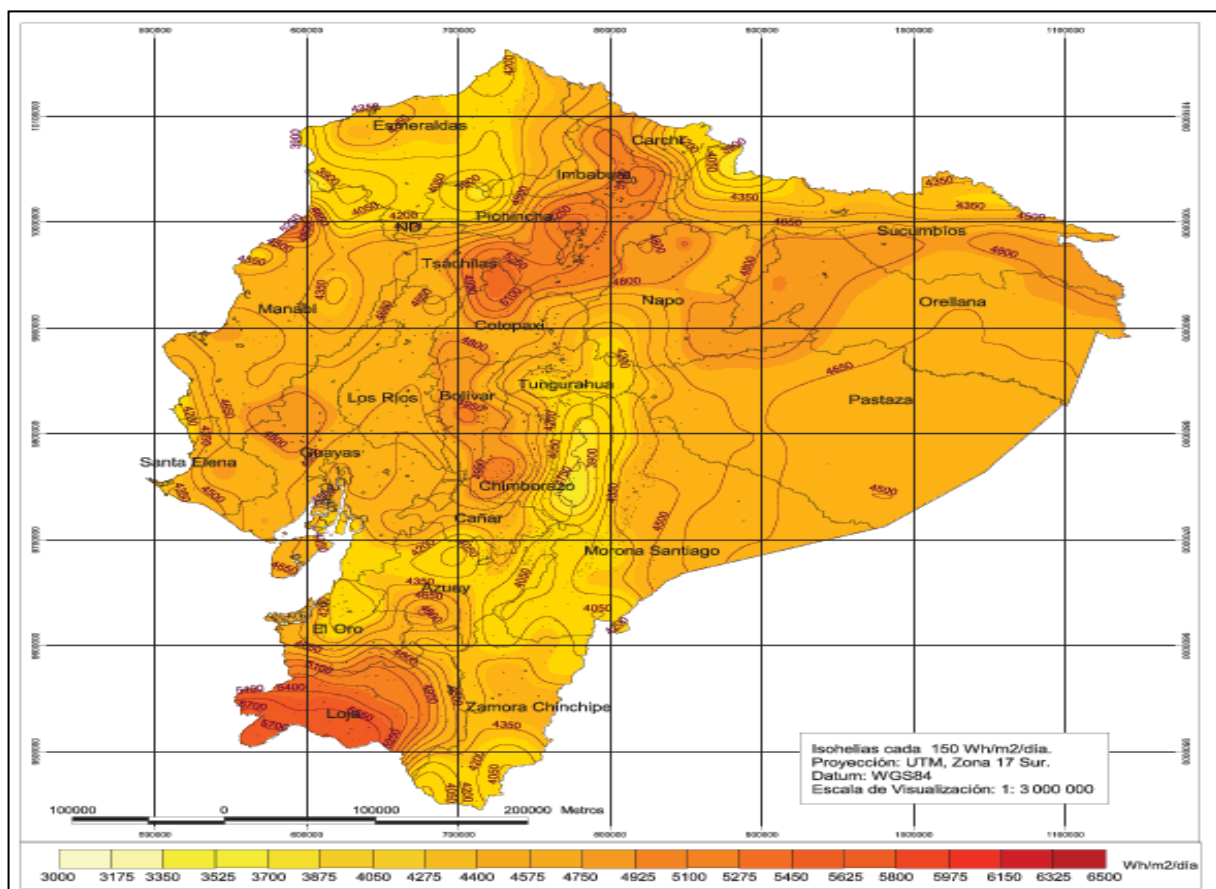


Fig.45: Promedio de radiación global Wh/m<sup>2</sup>/día.

Fuente: Atlas solar del ecuador CONELEC, 22/11/2012. Pág.49

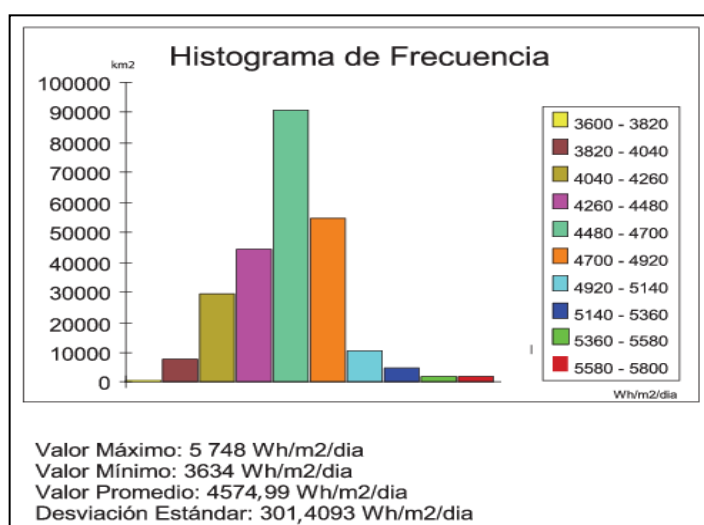


Fig.46: Histograma de frecuencia Wh/m<sup>2</sup>/día.

Fuente: Atlas solar del Ecuador CONELEC, 22/11/2012. Pág.49

### 4.2.2.1 Variación de la intensidad de la radiación solar

Un aspecto a considerar es la variabilidad en la inclinación del secador relacionada a la declinación solar, que representa el ángulo formado entre el vector sol-tierra y el plano ecuatorial y cuya inclinación es de  $23^{\circ}27'$  para los solsticios de diciembre y junio, mientras que la declinación es  $0^{\circ}$  para los equinoccios de marzo y septiembre, cuyo valor diario se calcula mediante la ecuación de Spencer (1971).

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \sin \alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha)180\pi \quad (4.1)$$

Donde  $\alpha$  representa la posición angular de la tierra en la órbita. Partiendo de que un cuerpo recibe mayor cantidad de radiación cuando el ángulo solar es  $90^{\circ}$  (medio día solar) y cuando se encuentra más cerca del ecuador, es decir tiene menor latitud (Gardey 2011), se ha establecido en la tabla adjunta el valor de inclinación mensual que se debe dar al secador para obtener su máximo rendimiento en la zona, para lo cual se parte del resultado experimental y se calcula esta variación.

Tabla 7: Inclinación para el secador de acuerdo a la declinación solar y latitud.

Fuente: Autor basada en Gardey 2011.

| Mes     | Fecha | Día del mes en el cual se produce la declinación <sup>22</sup> | Declinación solar | Inclinación anual para el secador solar |      | Radiación solar diaria | Altitud solar al medio día | Orientación |
|---------|-------|--|-------------------|---|------|------------------------|----------------------------|-------------|
|         |       | nδ   | δ                 | grados (°)                              | (%)  |                        | grados (°)                 | N-S         |
| Enero   | 17    | 17   | -20,9             | 2,56                                    | 4,50 | 29,32                  | 71,38                      | Sur         |
| Febrero | 16    | 47   | -13,0             | 1,59                                    | 2,80 | 30,16                  | 79,35                      | Sur         |
| Marzo   | 16    | 75   | -2,4              | 0,29                                    | 0,50 | 30,2                   | 89,88                      | Sur         |

<sup>22</sup> "Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces", S.A. Klein, Solar Energy, 19, 325(1977).



|             |    |     |        |      |          |       |       |       |
|-------------|----|-----|--------|------|----------|-------|-------|-------|
| Abril       | 15 | 105 | 9,4    | 1,15 | 2,0<br>0 | 28,87 | 78,29 | Norte |
| Mayo        | 15 | 135 | 18,8   | 2,30 | 4,0<br>0 | 26,86 | 68,91 | Norte |
| Junio       | 11 | 162 | 23,1   | 2,82 | 4,9<br>0 | 25,64 | 64,61 | Norte |
| Julio       | 17 | 198 | 21,2   | 2,59 | 4,5<br>0 | 26,07 | 66,52 | Norte |
| Agosto      | 16 | 228 | 13,5   | 1,65 | 2,9<br>0 | 27,84 | 74,25 | Norte |
| Septiembre  | 15 | 258 | 2,2    | 0,27 | 0,5<br>0 | 29,27 | 85,48 | Sur   |
| Octubre     | 15 | 288 | -9,6   | 1,17 | 2,1<br>0 | 29,99 | 82,7  | Sur   |
| Noviembre   | 14 | 318 | -18,9  | 2,31 | 4,0<br>0 | 29,4  | 73,39 | Sur   |
| Diciembre   | 10 | 344 | -23,0  | 2,81 | 4,9<br>0 | 28,9  | 69,25 | Sur   |
| Experimento | 25 | 359 | -23,39 | 2,86 | 5        | 28,88 | 68,91 |       |

La tabla 7 muestra las distintas inclinaciones que debe tener el secador solar a lo largo del año, en donde se observa que en los equinoccios (marzo y septiembre) la inclinación es mínima debida a que el ángulo solar en  $90^\circ$ , lo contrario ocurre en los períodos de solsticios (diciembre y junio) en donde se debe inclinar el secador según indica la tabla.

La Fig.47 ilustra la relación entre la declinación solar en un día específico de cada mes, y la correspondiente inclinación del secador solar, observándose el comportamiento sinusoidal de cada una de ellas a lo largo del período.



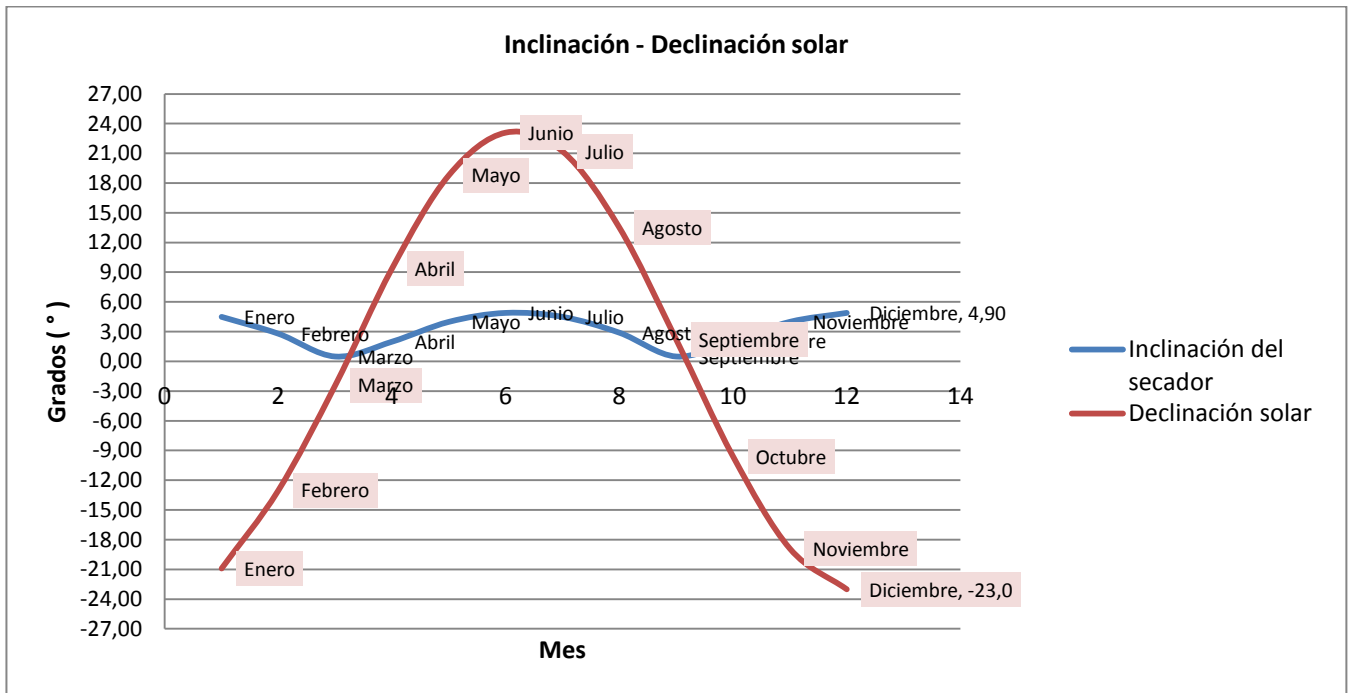


Fig.47: Grafico de la relación declinación solar e inclinación para el secador solar.

Fuente: Autor

### 4.2.3 Equipo utilizado

Para realizar el experimento y verificar su eficiencia, tal como se verá en detalle más adelante, se necesita el equipo para controlar las variables climatológicas así como de proceso dentro del experimento, es así que a continuación se describen cada uno de los instrumentos utilizados en la experiencia.

#### Balanza Analítica

Se usa para la determinación de masas en laboratorio, en este estudio se utiliza para registrar la humedad inicial del producto con una precisión de 0,0001g.



Fig.48: Balanza analítica precisión 0,0001 g.

Fuente: Autor.

## Balanza Electrónica

Por definición, una balanza electrónica es un instrumento para pesar cuya capacidad va desde un gramo hasta algunos kilogramos, en el experimento se la utiliza para determinar la pérdida de peso del producto dentro del secador solar.

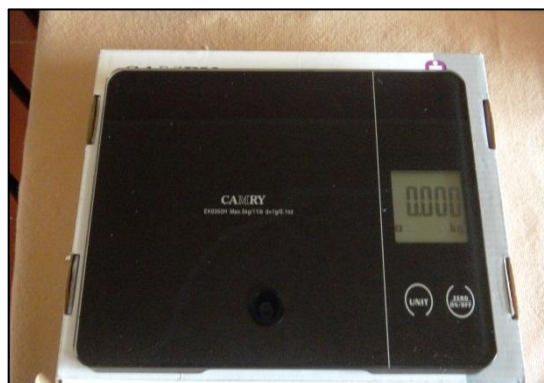


Fig.49: Balanza electrónica precisión 1 g.

Fuente: Autor.

## Sistema de posicionamiento global GPS

El GPS permite ubicar satelitalmente cualquier objeto con la precisión de algunos metros dependiendo del tipo de instrumento, en este caso se utiliza un equipo con una precisión de 5 metros, para ubicar la zona en donde se realiza el experimento, así como para delimitar el área de influencia del estudio y presión atmosférica.



Fig.50: GPS GARMIN OREGON 550.

Fuente: Autor.

## Anemómetro

El anemómetro es un aparato meteorológico que se usa para la predicción del tiempo y, específicamente, para medir la velocidad del viento, en este estudio se utiliza para determinar las condiciones ideales de secado de acuerdo a la dirección y velocidad del viento.



Fig.51: ANEMOMETRO DKI TYP.

Fuente: Autor.

## Higrómetro

Un higrómetro o hidrógrafo es un instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire, u otro gas, en este estudio se utiliza para determinar la humedad relativa en ambientes distintos dentro del secador.



Fig.52: HIGROMETRO RADIOSHACK 63-334.

Fuente: Autor.

## Termómetro

Es un instrumento usado para medir la temperatura de un cuerpo, en este estudio se utiliza para medir las temperaturas dentro y fuera del secador.



Fig.53: TERMOMETRO HACH SENSION1.

Fuente: Autor.

## Software AutoCAD

AutoCAD es un programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones. Es uno de los programas más usados, elegido por arquitectos, ingenieros y diseñadores. En este estudio se utiliza para el diseño del secador solar inclinado así como para sus componentes.

## Software ArcGIS

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica. Brinda varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. En este estudio se utiliza para vectorizar el área de influencia del estudio es decir zonificar los cultivos de cacao.

## Software Statgraphics

Statgraphics es un paquete estadístico utilizado para analizar estadísticamente datos provenientes de mediciones o experimentos industriales, como sería Ingenieros de Proceso o de Calidad, personal de Investigación y Desarrollo, de Validación de



Métodos Analíticos, etc. STATGRAPHICS realiza todas las rutinas estadísticas que normalmente requieren las industrias, desde estadística básica (con un excelente módulo de estadística descriptiva y de análisis exploratorio de datos) hasta análisis complejos como diseño de experimentos y métodos multivariados, pasando por módulos de control de calidad, regresión avanzada y series de tiempo.

Este estudio utiliza este software en el diseño estadístico del experimento, para determinar condiciones óptimas de secado mediante el uso de variables respuesta en experiencias realizadas, y determinar el modelo matemático que se ajusta mejor al proceso de secado solar.

## **Software Geosol V 2.0**

El Programa Geosol V.2.0 es una herramienta informática útil para estos estudios ya que permite, a través de sus cálculos, conocer la posición del sol a lo largo del día, así como también una estimación de valores de Irradiación solar directa, difusa y total en MJ/m<sup>2</sup>, sobre cualquier superficie especificada por el usuario. Los excelentes resultados obtenidos al validar los valores calculados por el programa con los medidos evidencian su potencialidad como herramienta de estimación cuando no se dispone de valores de radiación solar medidos en el lugar donde se ha de realizar algún tipo de aprovechamiento solar. La utilización de uno u otro método dependerá de los datos de que se disponga. Así, si sólo se conoce la ubicación y altura del lugar deberá emplearse el método de Hottel. Si además se dispone de valores de temperatura y humedad relativa media se podrá utilizar el método de Page y si sólo se conoce el valor de la irradiación diaria media mensual sobre superficie horizontal deberá emplearse el método de LiuJordan. Con cualquiera de los tres métodos se pueden realizar estudios para determinar la pendiente óptima de una superficie colectora de acuerdo al tipo de aprovechamiento (estacional o anual) que se desee realizar con ella (Hernández, 2003).

### **4.2.4 Proceso del experimento**

El experimento se realizó en cinco días, de los cuales en el primero se trabajó analíticamente con el secador solar y secado en tendal, realizando pruebas y

estimando posteriormente el tiempo total de secado, para lo cual se emplearon las fórmulas fundamentales del secado. Para esto se utilizó todas las variables del secador, es decir zeolita y porcentaje de inclinación. Al final se comparó los dos tipos de secado.

El segundo día se realizó la experiencia en presencia y ausencia de zeolita, y una inclinación constante del 5%, de modo similar se estimó el tiempo total de secado, para lo cual se emplearon las fórmulas fundamentales del secado. Al final se comparó entre ambos ensayos.

Mientras que los días posteriores se realizó la experiencia de secado solar en el lugar, sin el empleo de ecuaciones de secado, con el fin de corroborar los resultados analíticos.

El estudio está dividido en dos partes, la primera, presenta un paneo general sobre los elementos utilizados en el experimento y las condiciones en las cuales es realizado; la segunda parte explica en detalle el proceso.

## Datos y condiciones generales del experimento

Entre los elementos del experimento tenemos:

### 1. Cacao CCN-51

Se utiliza 9 kg de cacao CCN-51 el cual fue expuesto a 4 días de fermentación.

### 2. Zeolita

Se utiliza 24 kg de zeolita del tipo clinoptilolita la cual tiene la siguiente ficha técnica.

Tabla 8: Ficha técnica de la zeolita que se usa en el experimento.

Fuente: [www.minmetec.ec](http://www.minmetec.ec), 2012<sup>23</sup>

| ANÁLISIS QUÍMICO               |       |
|--------------------------------|-------|
|                                | %     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,73 |
| SiO <sub>2</sub>               | 67,28 |

<sup>23</sup> Minmetec (Minerales no metálicos del Ecuador) es la empresa en donde se adquirió la zeolita para el experimento.

|   |                |
|---|----------------|
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>            | 0,25           |
| Na <sub>2</sub> O                         | 2,1            |
| MgO                                       | 0,25           |
| CaO                                       | 0,87           |
| K <sub>2</sub> O                          | 1,97           |
| Pérdida fuego                             | 13,21          |
| <b>CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO</b> |                |
|   | meq/100g       |
| Mg  | 1,35           |
| Ca  | 43,22          |
| K   | 9,61           |
| Na  | 50,33          |
| Total                                     | 104,52meq/100g |
| <b>CALOR DE ADSORCION: 13,5°C</b>         |                |
| <b>GRANULOMETRIA: 0-3mm</b>               |                |

### 3. Condiciones Meteorológicas

Para realizar del experimento se han considerado datos meteorológicos de la zona, de donde se han establecido parámetros promedio de condiciones climáticas como:

Humedad relativa promedio: 68,52%

Temperatura promedio: 25,1°C

Velocidad del viento: 3,70 Km/h

Presión atmosférica: 993,09 mb

Radiación solar<sup>24</sup>: 24,84 MJ/m<sup>2</sup>

<sup>24</sup> Calculado en base al software GEOSOL V 2.0





Tabla 9: Datos meteorológicos de la zona de estudio.

Fuente: Autor

| FECHA      | HORA  | PRECIP.<br>(mm) | TEMPERATURA (°C) |      |       | H. RELATIVA (%) |      |       | VIENTO DE SUPERFICIE<br>(Km/h) |           | PRESION (mb) |       |         | T.PRESENTE         | RADIACION<br>SOLAR<br>MJ/m <sup>2</sup> |
|------------|-------|-----------------|------------------|------|-------|-----------------|------|-------|--------------------------------|-----------|--------------|-------|---------|--------------------|---|
|            |       |                 | MAX              | MIN  | PROM. | MAX.            | MIN. | PROM. | VELOCIDAD                      | DIRECCION | MAX.         | MIN.  | PROM.   | OBSERVADO          |   |
| 19/11/2012 | 9:00  | 0               | 25               | 21,5 | 23,25 | 87              | 85   | 86    | 2,91                           | Noroeste  | 993          | 992,8 | 992,9   | Lluvioso           | 24,91                                   |
|            | 16:00 | 0               | 23               | 20,6 | 21,8  | 70              | 67   | 68,5  | 1,66                           | Oeste     | 989          | 988,8 | 988,9   | Parcial<br>nublado |   |
| 20/11/2012 | 9:00  | 0               | 26               | 24,7 | 25,35 | 70              | 65   | 67,5  | 1,5                            | Noroeste  | 992,8        | 992,7 | 992,75  | Parcial<br>nublado | 24,92                                   |
|            | 16:00 | 0               | 29               | 26,7 | 27,85 | 52              | 51   | 51,5  | 2,6                            | Oeste     | 992,8        | 991,5 | 992,15  | Parcial<br>nublado |   |
| 21/11/2012 | 9:00  | 0               | 27               | 25   | 26    | 53              | 47   | 50    | 8                              | Noroeste  | 993          | 991,5 | 992,25  | Parcial<br>nublado | 24,99                                   |
|            | 16:00 | 0,1             | 29               | 25,9 | 27,45 | 51              | 49   | 50    | 5,3                            | Suroeste  | 989,9        | 988,8 | 989,35  | Lluvioso           |   |
| 22/11/2012 | 9:00  | 0               | 26               | 25,4 | 25,7  | 70              | 66   | 68    | 2                              | Noroeste  | 993,2        | 992,8 | 993     | Parcial<br>nublado | 24,8                                    |
|            | 16:00 | 0               | 27,5             | 24,8 | 26,15 | 75              | 71   | 73    | 2                              | Suroeste  | 1009         | 998,5 | 1003,75 | Nublado            |   |
| 23/11/2012 | 9:00  | 0               | 26               | 24,4 | 25,2  | 62              | 58   | 60    | 6                              | Noroeste  | 992,4        | 991,5 | 991,95  | Parcial<br>nublado | 24,83                                   |
|            | 16:00 | 0               | 28,5             | 26,7 | 27,6  | 77              | 73   | 75    | 3,8                            | Oeste     | 1008         | 1002  | 1005    | Parcial<br>nublado |   |
| 24/11/2012 | 9:00  | 0               | 25,4             | 24,2 | 24,8  | 84              | 78   | 81    | 8                              | Oeste     | 992,7        | 991,5 | 992,1   | Parcial<br>nublado | 24,65                                   |
|            | 16:00 | 0,1             | 25,3             | 23,1 | 24,2  | 75              | 72   | 73,5  | 3                              | Oeste     | 988,8        | 987,3 | 988,05  | Nublado            |   |
| 25/11/2012 | 9:00  | 0               | 21,5             | 20,4 | 20,95 | 70              | 68,7 | 69,35 | 3                              | Este      | 993          | 992,8 | 992,9   | Parcial<br>nublado | 24,79                                   |
|            | 16:00 | 0,7             | 26               | 24,3 | 25,15 | 87              | 85   | 86    | 2                              | Este      | 988,8        | 987,5 | 988,15  | Lluvioso           |   |



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

|          |  |      |       |       |       |       |       |       |      |  |  |  |        |  |       |
|----------|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--|--|--|--------|--|-------|
| PROMEDIO |  | 0,06 |       |       | 25,10 |       |       | 68,52 | 3,70 |  |  |  | 993,09 |  | 24,84 |
| MAXIMO   |  |      | 26,09 |       |       | 70,21 |       |       |      |  |  |  |        |  |       |
| MINIMO   |  |      |       | 24,12 |       |       | 66,83 |       |      |  |  |  |        |  |       |

## Procedimiento

### Determinación de la humedad inicial de la muestra en laboratorio

En una muestra de cacao fermentado se realiza la determinación del contenido inicial de humedad según lo establecido por (Nielsen, 2003).

Contenido inicial de humedad del cacao = 57%

Contenido de materia seca = 43%

### Determinación de la pérdida de peso del cacao en el experimento

Una vez determinado en el laboratorio el contenido de humedad del cacao, se procede a pesar 9 kg de cacao fermentado, los cuales se distribuyen en 3 partes iguales de 3 kg cada una.

Esta separación tiene por objetivo realizar 3 escenarios de experimentación, para evaluar al grado de inclinación del secador manteniendo constante la cantidad de zeolita. A continuación se muestran los escenarios posibles.

Tabla 10: Escenarios para determinar la eficiencia en la inclinación del secador solar.

Fuente: Autor

| PESO DE CACAO<br>(kg) | INCLINACION<br>(%) | ZEOLITA(kg) | ESCENARIO |
|-----------------------|--------------------|-------------|-----------|
| 3                     | 5                  | 12          | 1         |
| 3                     | 15                 | 12          | 2         |
| 3                     | *                  | *           | 3*        |

\* Secado en tendal a cielo abierto.

Luego se evalúan otros escenarios. El cuarto utilizando el proceso de secado más eficiente de los experimentos contenidos en los escenarios 1 y 2 de la tabla 10, estos nuevos experimentos se los realiza con o sin la presencia de zeolita, de este modo se establece la incidencia de la zeolita en el proceso.

El quinto escenario corresponde el realizar toda la experiencia de secado, es decir sin cálculo analítico, de este modo se comparan los resultados de éste, con los obtenidos en el cálculo analítico. Para lo cual se utiliza el tipo de secado que generó mejores resultados en el experimento y el secado solar en tendal, calculados analíticamente.

Luego se construye la curva de secado partiendo de la masa inicial de 3 kg de cacao para cada experimento, con intervalos de 30 minutos en cada caso, los datos se disponen en la siguiente tabla.

Tabla 11: Datos para construir la curva de secado de cacao.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg)         | m (kg) | wi(kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|----------------|--------|-------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |                |        |             |         |                       |
| 0      | 0       | 1,71114 | <b>1,29086</b> | 3,002  | 1,3256      | 1,2280  | 1,1721                |
| 30     | 0,500   | 1,5675  | 1,1825         | 2,75   | 1,1304      | 1,0366  | 1,0311                |
| 60     | 1,000   | 1,42956 | 1,07844        | 2,508  | 0,9429      | 0,8817  | 0,6140                |
| 90     | 1,500   | 1,3395  | 1,0105         | 2,35   | 0,8205      | 0,7895  | 0,2913                |
| 120    | 2,000   | 1,2939  | 0,9761         | 2,27   | 0,7585      | 0,7333  | 0,2286                |
| 150    | 2,500   | 1,25685 | 0,94815        | 2,205  | 0,7082      | 0,6884  | 0,1742                |
| 180    | 3,000   | 1,22778 | 0,92622        | 2,154  | 0,6687      | 0,6570  | 0,1001                |
| 210    | 3,500   | 1,21068 | 0,91332        | 2,124  | 0,6454      | 0,6439  | 0,0132                |
| 240    | 4,000   | 1,2084  | 0,9116         | 2,12   | 0,6423      | 0,6400  | 0,0197                |
| 270    | 4,500   | 1,20498 | 0,90902        | 2,114  | 0,6377      | 0,6346  | 0,0262                |
| 300    | 5,000   | 1,20042 | 0,90558        | 2,106  | 0,6315      | 0,6276  | 0,0326                |
| 330    | 5,500   | 1,19472 | 0,90128        | 2,096  | 0,6237      | 0,6202  | 0,0292                |
| 360    | 6,000   | 1,18959 | 0,89741        | 2,087  | 0,6168      | 0,6137  | 0,0259                |
| 390    | 6,500   | 1,18503 | 0,89397        | 2,079  | 0,6106      | 0,6082  | 0,0193                |
| 420    | 7,000   | 1,18161 | 0,89139        | 2,073  | 0,6059      | 0,6036  | 0,0193                |
| 450    | 7,500   | 1,17819 | 0,88881        | 2,067  | 0,6013      | 0,5989  | 0,0192                |
| 480    | 8,000   | 1,17477 | 0,88623        | 2,061  | 0,5966      | 0,5943  | 0,0192                |
| 510    | 8,500   | 1,17135 | 0,88365        | 2,055  | 0,5920      | 0,5896  | 0,0191                |
| 540    | 9,000   | 1,16793 | 0,88107        | 2,049  | 0,5873      | 0,2937  |                       |

De donde:

$m_w = \text{Masa de agua en la muestra kg}$

$m_s = \text{Masa seca en la muestra kg}$

$m = \text{Pérdida de peso de la muestra kg}$

$w_i = \text{Humedad en la muestra } \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}}$

$$w = \text{Humedad media en la muestra} \frac{\text{kg agua}}{\text{kg sólido seco}}$$

$$v = \text{Velocidad de secado} \frac{\text{kg}}{\text{hm}^2}$$

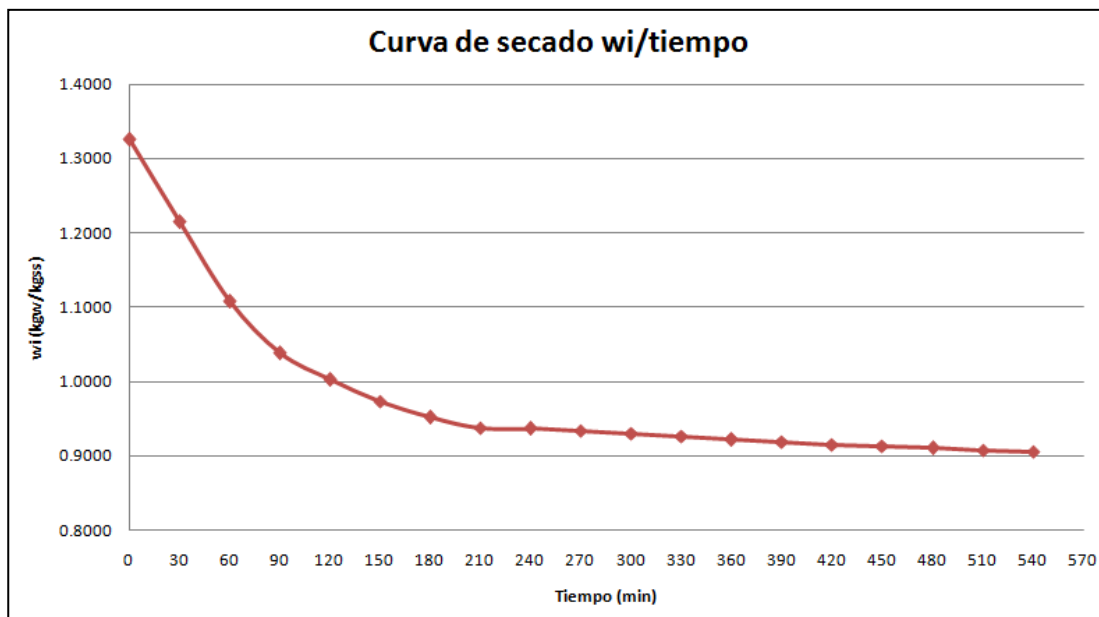


Fig.54: Curva de secado de cacao.

Fuente: Autor

De este modo se obtiene una curva como lo indica la (Fig 54) para cada caso de estudio. Luego se determina la humedad crítica de secado así como el tiempo crítico, para realizar una comparación entre los 3 casos y verificar el experimento que presenta mejores condiciones de secado.

### Cálculo de Humedad y tiempo crítico

Según Saldaña (2004) para el cálculo del tiempo y humedad crítica se emplea linealización de los segmentos de la curva de secado, siendo la humedad y el tiempo crítico el punto donde existe el cambio más notable de pendiente en la curva de secado, se procede a estimar para cada prueba dichas variables de la siguiente manera:

- 1.- Se toma la curva de secado respectiva a cada prueba y se divide por aproximaciones lineales en pequeños intervalos.
- 2.- Una vez conocidas las ecuaciones de estas curvas linealizadas se derivan, obteniendo así las pendientes respectivas, de esta manera se van verificando en qué punto se da el cambio de pendiente más notable, el cual es tomado como la humedad crítica ( $w_c$ ) en el tiempo crítico ( $t_c$ ). La (Fig. 55) ilustra las aproximaciones lineales para la determinación del tiempo crítico de secado.

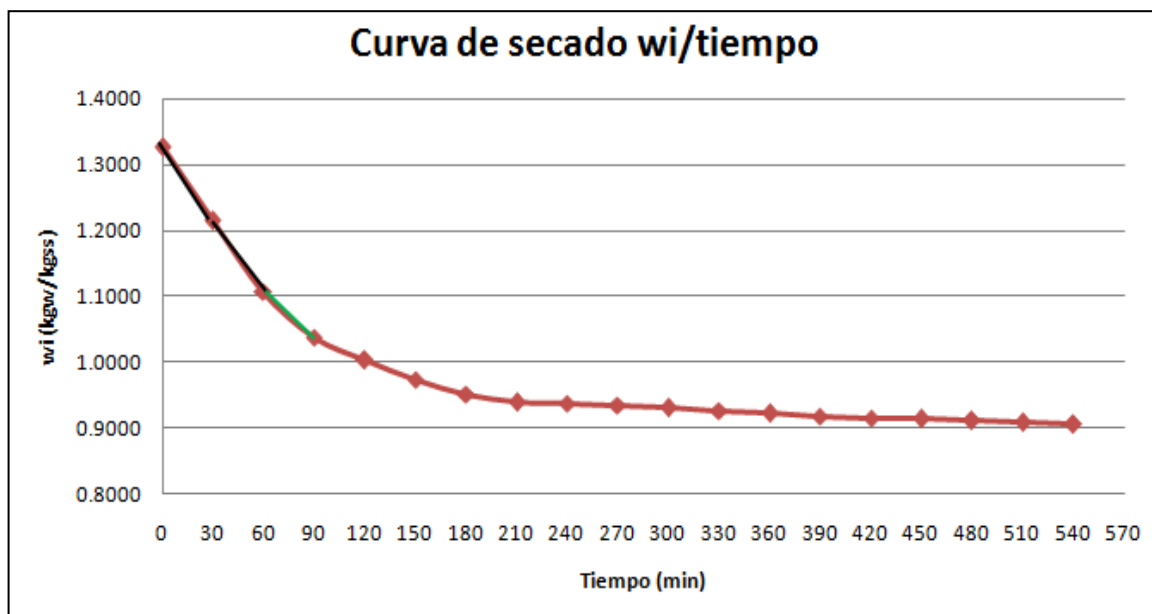


Fig.55: Aproximaciones lineales para la determinación del tiempo crítico en el secado de cacao.

Fuente: Autor basada en (Saldaña, 2004)

En la tabla 12, se muestra la linealización de cada recta perteneciente a cada intervalo de tiempo, del mismo modo se ilustran las pendientes de la recta como los valores de humedad y tiempo crítico calculados en base al cambio de pendiente.

Tabla 12: Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico, fuente propia

|                  | Rectas                | Pendientes | Cambio de pendiente |              |          |
|------------------|-----------------------|------------|---------------------|--------------|----------|
| Intervalos (min) | y                     | y'         | $\Delta m$          | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
| 0-30             | $y = -0,006x + 1,325$ | -0,006     |                     | 0,9429       | 60       |
| 30-60            | $y = -0,006x + 1,317$ | -0,006     | 0,000               |              |          |
| 60-90            | $y = -0,004x + 1,187$ | -0,004     | <b>-0,002</b>       |              |          |
| 90-120           | $y = -0,002x + 1,006$ | -0,002     | -0,002              |              |          |

## Cálculo de la velocidad de secado

A partir de los datos de la curva de secado en la tabla 11, se calcula la velocidad de secado frente a la humedad, el período de velocidad constante va desde la humedad inicial, hasta la humedad crítica. El tiempo crítico hace referencia al tiempo necesario para reducir la humedad inicial hasta la humedad crítica. Mientras que el periodo de velocidad decreciente se extiende desde la humedad crítica hasta la humedad de equilibrio del sólido como se muestra en la (Fig. 56).

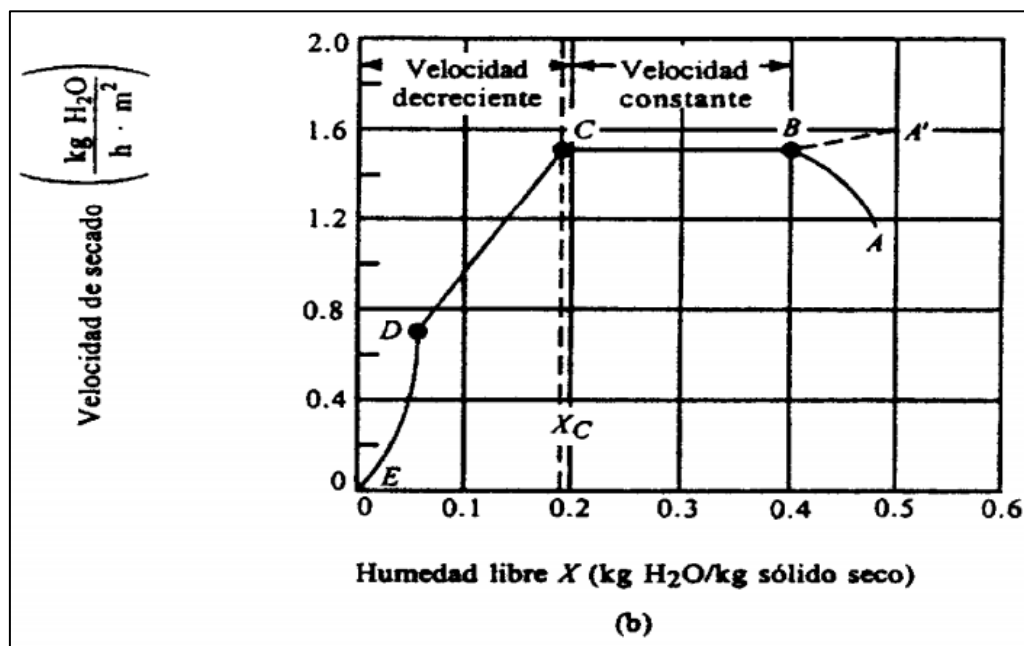


Fig.56: Curva de velocidad de secado.

Fuente: Restrepo, 2005



La velocidad de secado así como el tiempo crítico son valores fundamentales al momento de comparar la eficiencia del secador solar inclinado con absorbedor de zeolita.

### **Cálculo del tiempo total de secado**

Partiendo de lo establecido en el capítulo 1 en referencia al tiempo de secado, la duración total del proceso es la suma de 2 tiempos. El primero conocido como antecrítico y el segundo llamado poscrítico.

El cálculo se lo realiza utilizando la (Ec.1.9) de donde el resultado será el tiempo necesario para secar el producto en el primer período, de la misma forma con la (Ec.1.10) se calcula el tiempo necesario para secar el producto en el segundo período.

De donde el tiempo total para secar el producto desde una determinada humedad hasta la humedad de equilibrio es la suma de ambos tiempos, debiéndose tener en cuenta que la humedad de equilibrio lo establece la correspondiente isoterma de sorción del producto ver (Fig.26).

La Tabla adjunta muestra el resultado del cálculo analítico del tiempo total de secado.

Tabla 13: Estimación del tiempo total de secado.

Fuente: Autor



| Período 1 de Secado |                                  |   |                              |                              |                                  |   |  |                                   |
|---------------------|----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| masa m (kg)         | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media periodo 1 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad inicial wi (kgw/kgs) | Humedad Critica wc (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en periodo 1 (h) |
| 3,002               | 1                                | 0,939   | 1,3256                       | 0,9429                       | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 1,22                              |

| Período 2 de Secado |                                  |   |                              |                             |                                  |   |  |                                   |   |
|---------------------|----------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|
| masa m (kg)         | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media periodo 2 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad critica wc (kgw/kgs) | Humedad final wf* (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en periodo 2 (h) | Tiempo total de secado en periodo 1 y 2 (h) |
| 3,002               | 1                                | 0,1032  | 0,9429                       | 0,1736                      | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 22,38                             | 23,60                                       |

\* Humedad calculada de acuerdo a la isoterma de sorción del cacao mediante la ecuación de Halsey.  
57 % Humedad inicial representa 1,3256 kgw/kgs , la humedad de equilibrio de 7,5% representa 0,1736 kgw/kgs de cacao

## Determinación de humedades relativas dentro del secador solar

Esta determinación se la realiza para medir las condiciones de absorción de la zeolita dentro del proceso de secado solar, debido a que un ambiente más seco tiende a captar humedad hasta alcanzar el equilibrio termodinámico. Así la determinación se la realiza para dos ambientes distintos:

- Determinación de la humedad en el ambiente de la zeolita
- Determinación de la humedad en el ambiente de secado

Para esto se utilizan higrómetros, los cuales registran la humedad relativa de cada ambiente, cuyas lecturas se las registra cada hora.

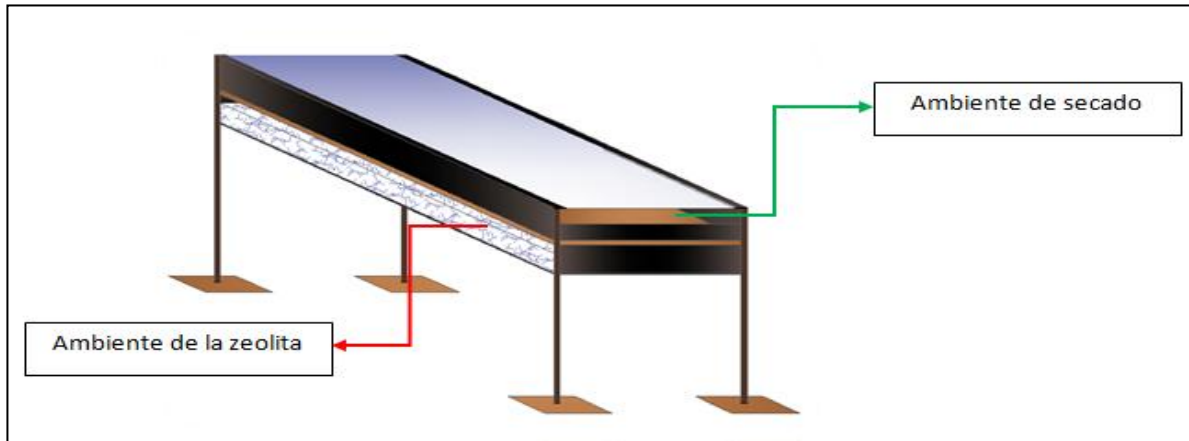


Fig.57: Ambientes dentro del secador solar inclinado.

Fuente: Autor

#### 4.2.5 Diseño estadístico de experimentos

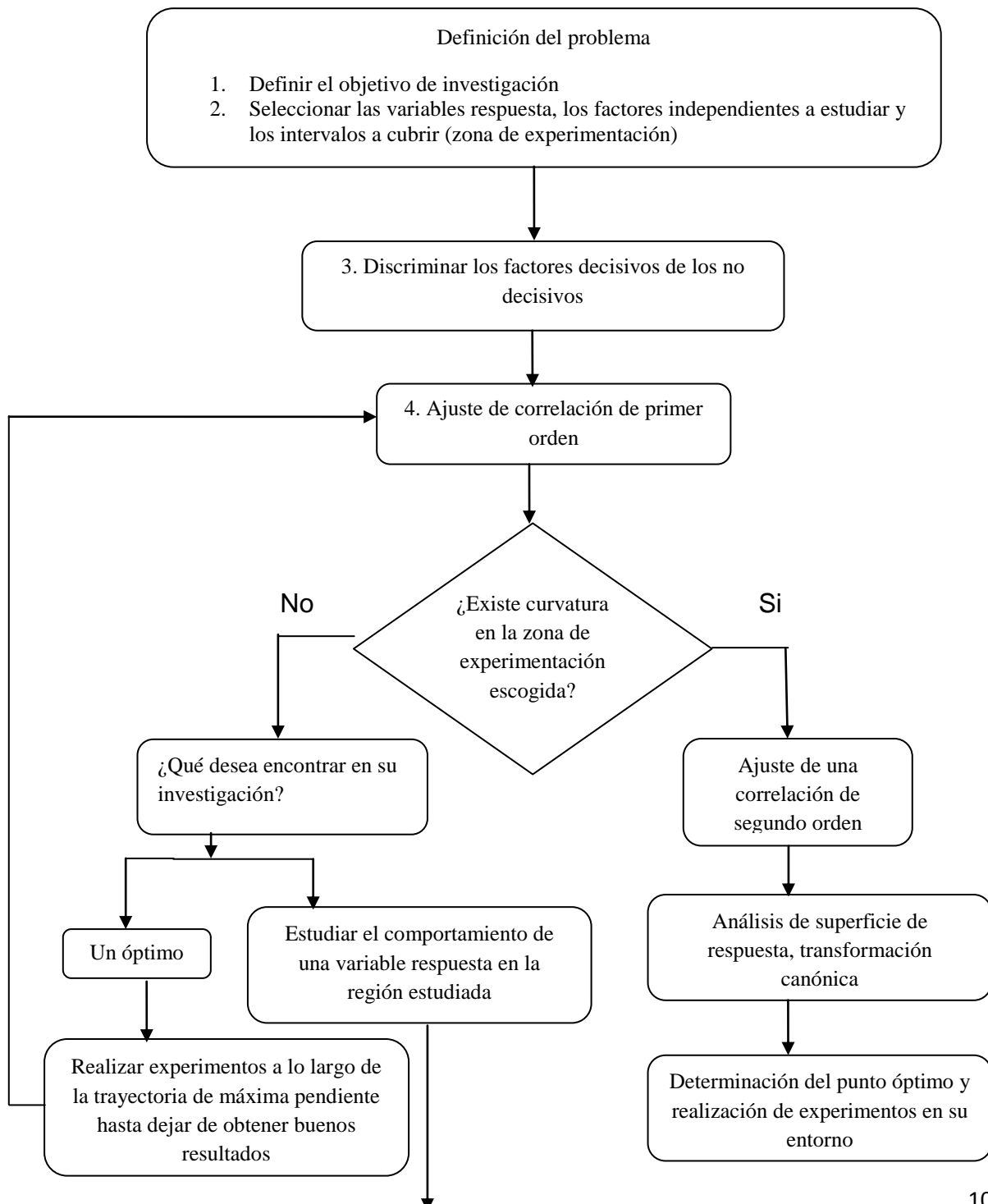
En el campo de las investigaciones, la optimización es uno de los problemas de mayor importancia, ya sea para la localización de las variables que hacen máxima la eficiencia de un equipo o el establecimiento de condiciones de procesos que conducen al mayor rendimiento de un producto. La determinación de las condiciones óptimas se realiza con la utilización o no de modelos matemáticos, pudiendo estos ser empíricos o fenomenológicos.

La utilización de uno u otro dependerá en gran medida del conocimiento teórico que se tenga del problema, los recursos económicos disponibles de las ciencias matemáticas y computacionales.

La estrategia de optimización experimental que se presenta, indica el camino mediante el cual un investigador puede encontrar de forma razonable los resultados deseados.<sup>25</sup>

Los pasos a seguir dentro de la estrategia de optimización experimental se ilustran en el siguiente esquema:

<sup>25</sup> Módulo Diseño Experimental. Maestría Gestión y Planificación Energética. Universidad de Cuenca.2010.





**Definición del problema:** El objetivo de esta investigación está relacionado con la busca de condiciones operacionales o de diseño que optimizan un parámetro de calidad o brindan informaciones sobre su comportamiento.

En la práctica las variables respuesta corresponden con parámetros de calidad o de operación de determinado producto o proceso los cuales son función de los niveles a los cuales los factores independientes son fijados.

Mientras mayor sea el número de factores independientes, mayor será el número de experimentos.

**Discriminar los factores decisivos de los no decisivos:** En el desarrollo del diseño experimental será necesario escoger cuál de los factores independientes sirven, es decir si efectivamente el factor escogido tiene significación sobre el proceso.

Estos factores necesariamente deben ser controlados por parte del investigador, de lo contrario la respuesta quedará alterada por un factor aleatorio, lo que acarrearía un aumento del error experimental consecuentemente interpretación errada de los resultados. La definición de factores, variables respuesta y niveles de los factores, son la base del éxito de todo diseño experimental.

**Diseño factorial completo  $2^k$ , ajuste de una correlación de primer orden:** Para realizar un diseño factorial, se selecciona un número fijo de niveles para cada uno de un conjunto de variables (factores) y luego se hace experimentos con todas las combinaciones posibles. Si hay  $L_1$  niveles para la primera variable,  $L_2$  para la segunda, ...,  $L_n$  para la enésima, el conjunto de todas las  $L_1, L_2, \dots, L_n$  condiciones experimentales se llama diseño factorial  $L_1. L_2. L_n$ .

Para el presente estudio se aplica un diseño factorial cuya variable ocurre a dos niveles. Los diseños factoriales  $2^k$  donde  $k$  representa el número de factores independientes recogen los diseños tipos más indicados para la primera etapa de la investigación y son importantes por varias razones.

- No requieren demasiados experimentos elementales por cada factor, y pueden indicar tendencias para determinar una dirección prometedora para futuros experimentos.
- Proporcionan casi siempre, los grados de libertad necesarios para verificar el ajuste del modelo, o, en su lugar, pueden utilizarse como núcleo de diseños más complejos.
- Explora todas las combinaciones de  $k$  factores a distintos niveles, brindando información acerca del efecto de cada factor individual y de sus interacciones.

Los diseños factoriales completos son utilizados cuando el número de factores es pequeño ( $<4$ ), o de alguna manera se tiene la seguridad que los seleccionados influyen significativamente sobre la respuesta en la zona de experimentación escogida.

Tabla 14: Factores y sus niveles.

Fuente: Autor

| Factores | Nivel inferior     | Nivel central | Nivel superior     |
|----------|--------------------|---------------|--------------------|
| $X_1$    | $xi_{inferior}(1)$ | $ai(1)$       | $xi_{superior}(1)$ |
| $X_2$    | $xi_{inferior}(2)$ | $ai(2)$       | $xi_{superior}(2)$ |

$$Xi = \frac{xi - ai}{mi} \quad (4.2)$$

$$ai = \frac{xi_{nivel superior} + xi_{nivel inferior}}{2} \quad (4.3)$$

$$mi = xi - ai \quad (4.4)$$

De donde:

$X_1, X_2$ : Variables independientes codificadas

$xi$ : Valor natural de los factores

$mi$ : Incremento del nivel de cada factor respecto al punto central.

A partir de las ecuaciones anteriores es posible determinar los valores codificados y reales para cada factor, que conforman la región experimental.

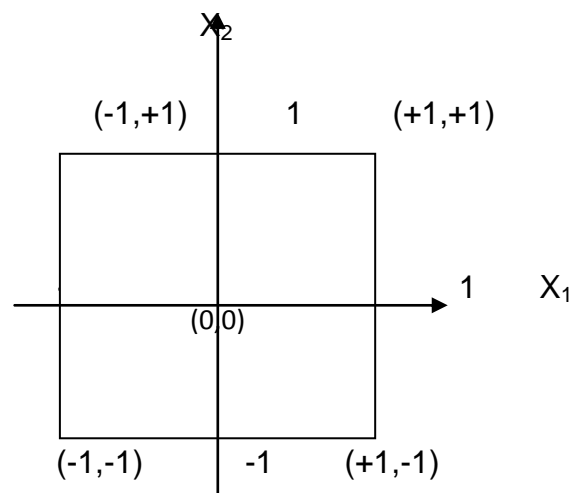


Fig.58: Región experimental.

Fuente: Autor

El paso siguiente, es construir la matriz de los experimentos, en la cual se recogen todos los experimentos posibles entre los factores independientes y sus niveles.

El número total de experimentos es  $2^k$ , donde  $k$  es el número de factores independientes por ejemplo ( $2^2 = 4$ ) experimentos.

Para la obtención de la ecuación del modelo matemático, así como para su análisis se recomienda utilizar programas computacionales, en este caso se ha usado Statgraphics, el cual evalúa estadísticamente los resultados, que se mostraran más adelante.

Tabla 15: Matriz de variable respuesta.

Fuente: Autor

| Numero de experimentos | Niveles |    | Variable Respuesta R (%) |
|------------------------|---------|----|--------------------------|
| 1                      | -1      | -1 | $R_1$                    |
| 2                      | +1      | -1 | $R_2$                    |
| 3                      | -1      | +1 | $R_3$                    |
| 4                      | +1      | +1 | $R_4$                    |

Para el estudio estadístico de experimentos en primer lugar se definen los elementos involucrados, factores, niveles y variable respuesta:

**Factor:** Se refiere a cualquier característica del experimento que pueda variar de un ensayo a otro. (Walpole y otros, 2009)

**Nivel:** Son los valores reales que se utilizan en el experimento (Walpole y otros, 2009)

**Variable Respuesta:** Es el elemento que contiene los resultados experimentales del ensayo.<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Módulo Diseño Experimental. Maestría Gestión y Planificación Energética. Universidad de Cuenca.2010.



## Procedimiento

Primero se determinan los factores, niveles y variables respuesta del experimento, en este estudio se hace un análisis estadístico de dos casos. El primero variando el grado de inclinación del secador solar, y el segundo con presencia y ausencia de zeolita.

En la tabla 16 se ilustran los factores y niveles respecto a la inclinación del secador solar, mientras que la tabla 17 muestra los factores y niveles respecto a la utilización de zeolita en el secador.

Tabla 16: Factores y niveles respecto al porcentaje de inclinación del secador solar.

Fuente: Autor

| Factor          | Nivel inferior | Nivel central | Nivel superior |
|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| Inclinación (%) | 5              | 10            | 15             |
| Tiempo (h)      | 3              | 6             | 9              |

**Variable respuesta Humedad  $w_i$  (kgw/kgs)**

Tabla 17: Factores y niveles respecto a la cantidad de zeolita presente en el secador solar inclinado.

Fuente: Autor



| Factor      | Nivel inferior | Nivel central | Nivel superior |
|-------------|----------------|---------------|----------------|
| Zeolita(kg) | 0              | 6             | 12             |
| Tiempo (h)  | 3              | 6             | 9              |

### Variable respuesta Humedad $w_i$ (kgw/kgs)

La matriz de variable respuesta para cada caso de estudio se detalla en la tabla 18 y tabla 19.

Tabla 18: Matriz de variable respuesta tomando el porcentaje de inclinación del secador solar.

Fuente: Autor

| Numero de experimentos | Tiempo (h) | Inclinación (%) | Humedad (kgw/kgs) |
|------------------------|------------|-----------------|-------------------|
| 1                      | 3          | 5               | $w_{i1}$          |
| 2                      | 9          | 5               | $w_{i2}$          |
| 3                      | 3          | 15              | $w_{i3}$          |
| 4                      | 9          | 15              | $w_{i4}$          |

Tabla 19: Matriz de variable respuesta tomando la cantidad de zeolita en el secador solar.

Fuente: Autor

| Numero de experimentos | Tiempo (h) | Zeolita (kg) | Humedad (kgw/kgs) |
|------------------------|------------|--------------|-------------------|
| 1                      | 3          | 0            | $w_{i1}$          |
| 2                      | 9          | 0            | $w_{i2}$          |
| 3                      | 3          | 12           | $w_{i3}$          |
| 4                      | 9          | 12           | $w_{i4}$          |

## 4.2.3 Resultados del experimento

Las tabla 20 muestra los datos medidos en el experimento del escenario 1 (ver tabla 10), en donde se trabaja con la inclinación del 5% del secador solar y con presencia de zeolita.



Tabla 20: Datos registrados para el secado solar de cacao con el 5% de inclinación.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg)         | m (kg) | wi(kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|----------------|--------|-------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |                |        |             |         |                       |
| 0      | 0       | 1,71114 | <b>1,29086</b> | 3,002  | 1,3256      | 1,2280  | 1,1721                |
| 30     | 0,500   | 1,5675  | 1,1825         | 2,75   | 1,1304      | 1,0366  | 1,0311                |
| 60     | 1,000   | 1,42956 | 1,07844        | 2,508  | 0,9429      | 0,8817  | 0,6140                |
| 90     | 1,500   | 1,3395  | 1,0105         | 2,35   | 0,8205      | 0,7895  | 0,2913                |
| 120    | 2,000   | 1,2939  | 0,9761         | 2,27   | 0,7585      | 0,7333  | 0,2286                |
| 150    | 2,500   | 1,25685 | 0,94815        | 2,205  | 0,7082      | 0,6884  | 0,1742                |
| 180    | 3,000   | 1,22778 | 0,92622        | 2,154  | 0,6687      | 0,6570  | 0,1001                |
| 210    | 3,500   | 1,21068 | 0,91332        | 2,124  | 0,6454      | 0,6439  | 0,0132                |
| 240    | 4,000   | 1,2084  | 0,9116         | 2,12   | 0,6423      | 0,6400  | 0,0197                |
| 270    | 4,500   | 1,20498 | 0,90902        | 2,114  | 0,6377      | 0,6346  | 0,0262                |
| 300    | 5,000   | 1,20042 | 0,90558        | 2,106  | 0,6315      | 0,6276  | 0,0326                |
| 330    | 5,500   | 1,19472 | 0,90128        | 2,096  | 0,6237      | 0,6202  | 0,0292                |
| 360    | 6,000   | 1,18959 | 0,89741        | 2,087  | 0,6168      | 0,6137  | 0,0259                |
| 390    | 6,500   | 1,18503 | 0,89397        | 2,079  | 0,6106      | 0,6082  | 0,0193                |
| 420    | 7,000   | 1,18161 | 0,89139        | 2,073  | 0,6059      | 0,6036  | 0,0193                |
| 450    | 7,500   | 1,17819 | 0,88881        | 2,067  | 0,6013      | 0,5989  | 0,0192                |
| 480    | 8,000   | 1,17477 | 0,88623        | 2,061  | 0,5966      | 0,5943  | 0,0192                |
| 510    | 8,500   | 1,17135 | 0,88365        | 2,055  | 0,5920      | 0,5896  | 0,0191                |
| 540    | 9,000   | 1,16793 | 0,88107        | 2,049  | 0,5873      | 0,2937  |                       |

Las tabla 21 muestra los datos medidos en el experimento del escenario 2 (ver tabla 10), en donde se trabaja con la inclinación del 15% del secador solar y con presencia de zeolita.

Tabla 21: Datos registrados para el secado solar de cacao con el 15% de inclinación.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg)         | m (kg) | wi(kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|----------------|--------|-------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |                |        |             |         |                       |
| 0      | 0       | 1,71171 | <b>1,29129</b> | 3,003  | 1,3256      | 1,2431  | 0,9907                |
| 30     | 0,500   | 1,5903  | 1,1997         | 2,79   | 1,1606      | 1,0716  | 0,9939                |
| 60     | 1,000   | 1,4592  | 1,1008         | 2,56   | 0,9825      | 0,9244  | 0,5948                |
| 90     | 1,500   | 1,3737  | 1,0363         | 2,41   | 0,8664      | 0,8319  | 0,3322                |
| 120    | 2,000   | 1,32297 | 0,99803        | 2,321  | 0,7974      | 0,7622  | 0,3271                |
| 150    | 2,500   | 1,2711  | 0,9589         | 2,23   | 0,7270      | 0,7006  | 0,2349                |
| 180    | 3,000   | 1,23234 | 0,92966        | 2,162  | 0,6743      | 0,6685  | 0,0502                |
| 210    | 3,500   | 1,22379 | 0,92321        | 2,147  | 0,6627      | 0,6565  | 0,0532                |
| 240    | 4,000   | 1,21467 | 0,91633        | 2,131  | 0,6503      | 0,6468  | 0,0297                |
| 270    | 4,500   | 1,20954 | 0,91246        | 2,122  | 0,6433      | 0,6402  | 0,0263                |
| 300    | 5,000   | 1,20498 | 0,90902        | 2,114  | 0,6371      | 0,6336  | 0,0295                |
| 330    | 5,500   | 1,19985 | 0,90515        | 2,105  | 0,6302      | 0,6271  | 0,0261                |
| 360    | 6,000   | 1,19529 | 0,90171        | 2,097  | 0,6240      | 0,6212  | 0,0227                |
| 390    | 6,500   | 1,1913  | 0,8987         | 2,09   | 0,6185      | 0,6166  | 0,0162                |
| 420    | 7,000   | 1,18845 | 0,89655        | 2,085  | 0,6147      | 0,6127  | 0,0161                |
| 450    | 7,500   | 1,1856  | 0,8944         | 2,08   | 0,6108      | 0,6092  | 0,0129                |
| 480    | 8,000   | 1,18332 | 0,89268        | 2,076  | 0,6077      | 0,6065  | 0,0096                |
| 510    | 8,500   | 1,18161 | 0,89139        | 2,073  | 0,6054      | 0,6042  | 0,0096                |
| 540    | 9,000   | 1,1799  | 0,8901         | 2,07   | 0,6030      |         |                       |

Las tabla 22 muestra los datos medidos en el experimento del escenario 3 (ver tabla 10), en donde se trabaja con secado solar en tendal.

Tabla 22: Datos registrados para el secado solar de cacao en tendal a cielo abierto.

Fuente: Autor

| Tiempo |        | mw (kg) | ms(kg)         | m (kg) | wi (kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|--------|---------|----------------|--------|--------------|---------|-----------------------|
| min)   | Horas) |         |                |        |              |         |                       |
| 0      | 0      | 1,71171 | <b>1,29129</b> | 3,003  | 1,3256       | 1,2826  | 0,5163                |
| 30     | 0,500  | 1,64844 | 1,24356        | 2,892  | 1,2396       | 1,1966  | 0,4972                |
| 60     | 1,000  | 1,58517 | 1,19583        | 2,781  | 1,1537       | 1,1188  | 0,3877                |
| 90     | 1,500  | 1,53387 | 1,15713        | 2,691  | 1,0840       | 1,0487  | 0,3793                |
| 120    | 2,000  | 1,482   | 1,118          | 2,6    | 1,0135       | 0,9709  | 0,4430                |
| 150    | 2,500  | 1,4193  | 1,0707         | 2,49   | 0,9283       | 0,8857  | 0,4242                |
| 180    | 3,000  | 1,3566  | 1,0234         | 2,38   | 0,8431       | 0,7978  | 0,4313                |
| 210    | 3,500  | 1,28991 | 0,97309        | 2,263  | 0,7525       | 0,7250  | 0,2489                |
| 240    | 4,000  | 1,24944 | 0,94256        | 2,192  | 0,6975       | 0,6817  | 0,1392                |
| 270    | 4,500  | 1,22607 | 0,92493        | 2,151  | 0,6658       | 0,6650  | 0,0067                |
| 300    | 5,000  | 1,22493 | 0,92407        | 2,149  | 0,6642       | 0,6638  | 0,0033                |
| 330    | 5,500  | 1,22436 | 0,92364        | 2,148  | 0,6635       | 0,6631  | 0,0033                |
| 360    | 6,000  | 1,22379 | 0,92321        | 2,147  | 0,6627       | 0,6600  | 0,0233                |
| 390    | 6,500  | 1,2198  | 0,9202         | 2,14   | 0,6573       | 0,6553  | 0,0166                |
| 420    | 7,000  | 1,21695 | 0,91805        | 2,135  | 0,6534       | 0,6518  | 0,0132                |
| 450    | 7,500  | 1,21467 | 0,91633        | 2,131  | 0,6503       | 0,6491  | 0,0099                |
| 480    | 8,000  | 1,21296 | 0,91504        | 2,128  | 0,6480       | 0,6468  | 0,0099                |
| 510    | 8,500  | 1,21125 | 0,91375        | 2,125  | 0,6456       | 0,6449  | 0,0066                |
| 540    | 9,000  | 1,21011 | 0,91289        | 2,123  | 0,6441       |         |                       |

La (Fig.59) ilustra gráficamente datos medidos en el experimento del escenario 1.

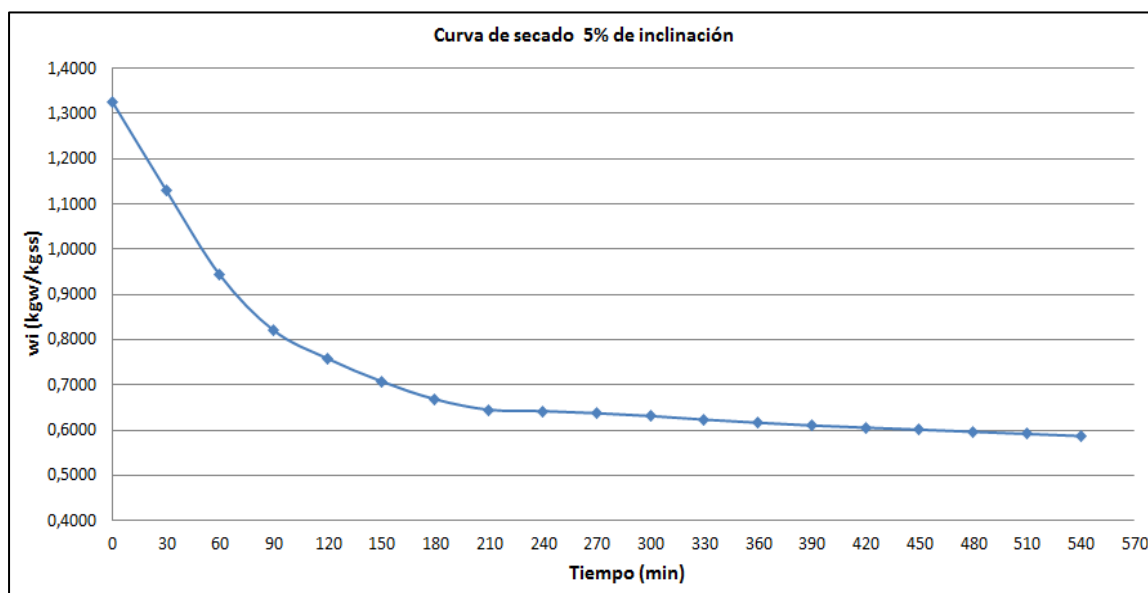


Fig.59: Gráfico de la curva de secado con el 5% de inclinación.

Fuente: Autor

La (Fig.60) ilustra gráficamente datos medidos en el experimento del escenario 2.

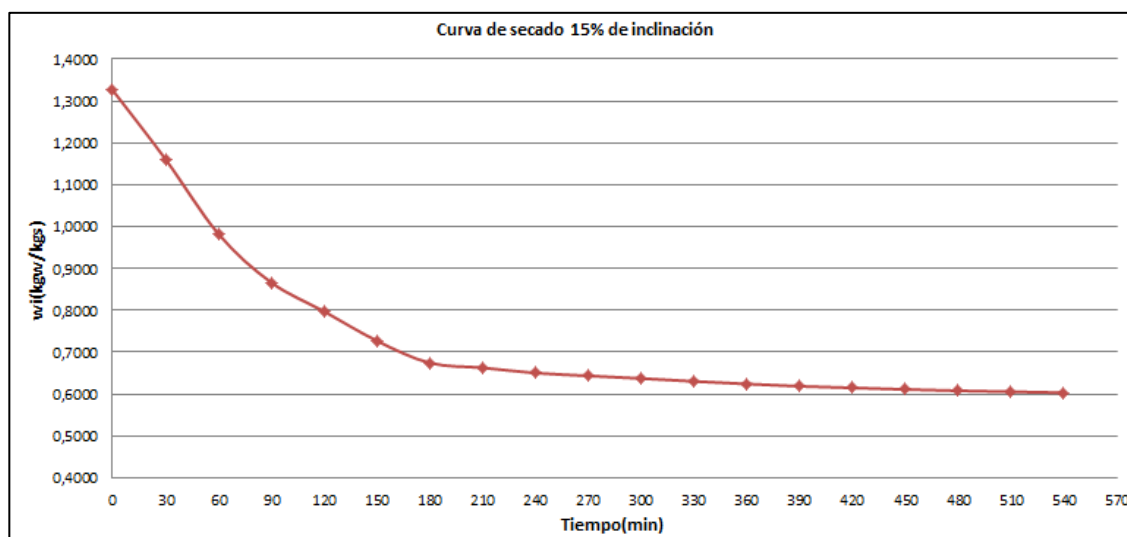


Fig.60: Gráfico de la curva de secado con el 15% de inclinación.

Fuente: Autor

La (Fig.61) ilustra gráficamente datos medidos en el experimento del escenario 3.

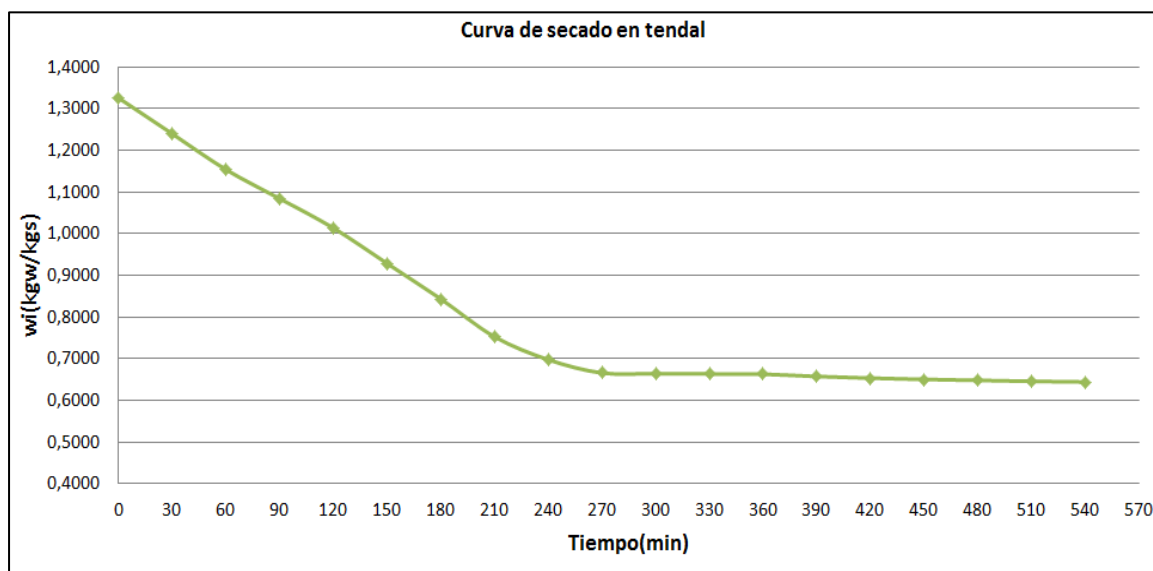


Fig.61: Gráfico de la curva de secado en tendal a cielo abierto.

Fuente: Autor

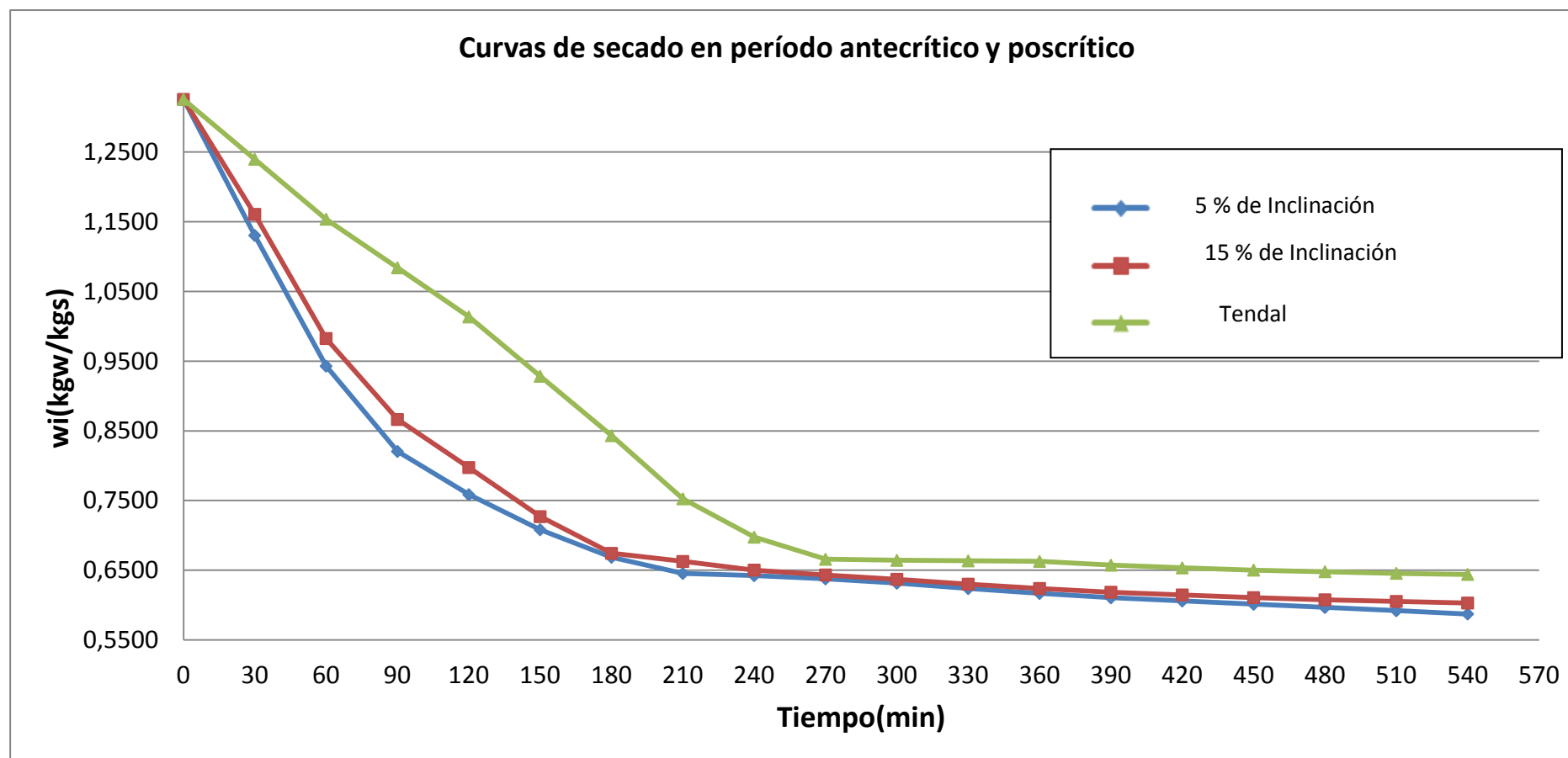


Fig.62: Gráfico de las curvas de secado con el 5%, 15% y secado en tendal.

Fuente: Autor



La Fig.62 muestra el comportamiento de los tres tipos de secado en donde se observa claramente el periodo antecrítico de secado, en el cual existe una mayor velocidad por ende mayor cantidad da humedad removida, luego la curva sufre un cambio de pendiente en el punto de humedad crítica, a partir de ahí comienza un segundo período de secado caracterizado por la disminución de la velocidad hasta alcanzar el equilibrio.

En el caso de estudio se observa una mayor velocidad antecrítica de secado para los experimentos con el secador inclinado, no así para el secado en tendal, el cual presenta una velocidad menor en el período antecrítico, luego en el período poscrítico las velocidades disminuyen en los tres casos, aunque se mantiene la tendencia de mayor velocidad en el secado solar inclinado con el 5%.

A continuación se muestran los resultados de humedad y tiempo crítico calculados por linealización para los escenarios 1,2 y 3.

Tabla 23: Intervalos y aproximaciones de humedades críticas y tiempos críticos de secado.

Fuente: Autor

| Inclinación del 5% del secador  |                   |            |                     |              |          |
|---------------------------------|-------------------|------------|---------------------|--------------|----------|
| Intervalos (min)                | Rectas            | Pendientes | Cambio de pendiente | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
|                                 | y                 | y'         | Δm                  |              |          |
| 0-30                            | y = -0,006x+1,325 | -0,006     |                     | 0,9429       | 60       |
| 30-60                           | y = -0,006x+1,317 | -0,006     | 0,000               |              |          |
| 60-90                           | y= -0,004x+1,187  | -0,004     | -0,002              |              |          |
| 90-120                          | y= -0,002x+1,006  | -0,002     | -0,002              |              |          |
|                                 |                   |            |                     |              |          |
| Inclinación del 15% del secador |                   |            |                     |              |          |
| Intervalos (min)                | Rectas            | Pendientes | Cambio de pendiente | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
|                                 | y                 | y'         | Δm                  |              |          |
| 0-30                            | y = -0,005x+1,325 | -0,005     |                     | 0,8664       | 90       |
| 30-60                           | y = -0,005x+1,333 | -0,005     | 0,000               |              |          |
| 60-90                           | y= -0,003x+1,211  | -0,004     | -0,001              |              |          |
| 90-120                          | y= -0,002x+1,073  | -0,002     | -0,002              |              |          |
|                                 |                   |            |                     |              |          |
| Secado en tendal                |                   |            |                     |              |          |
| Intervalos (min)                | Rectas            | Pendientes | Cambio de pendiente | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
|                                 | y                 | y'         | Δm                  |              |          |
| 0-30                            | y = -0,002x+1,325 | -0,002     |                     | 0,6975       | 240      |
| 30-60                           | y = -0,002x+1,325 | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 60-90                           | y = -0,002+1,293  | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 90-120                          | y =-0,002+1,295   | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 120-150                         | y =-0,002+1,354   | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 150-180                         | y =-0,002+1,354   | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 180-210                         | y =-0,003+1,386   | -0,003     | 0,001               |              |          |
| 210-240                         | y =-0,001+1,137   | -0,001     | -0,002              |              |          |
| 240-270                         | y =-0,001+0,951   | -0,001     | 0,000               |              |          |

Las tablas 24 y 25 muestran el resultado medido del cuarto escenario del experimento, es decir, utilizando el secador solar con una inclinación constante del 5% (presentó mejores resultados) y variando la presencia de la zeolita.

Tabla 24: Datos registrados para el secado solar de cacao con zeolita.

Fuente: Autor



| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg)         | m (kg) | wi (kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|----------------|--------|--------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |                |        |              |         |                       |
| 0      | 0       | 1,71057 | <b>1,29043</b> | 3,001  | 1,3256       | 1,2903  | 0,4233                |
| 30     | 0,500   | 1,6587  | 1,2513         | 2,91   | 1,2551       | 1,2241  | 0,3608                |
| 60     | 1,000   | 1,6131  | 1,2169         | 2,83   | 1,1931       | 1,1625  | 0,3465                |
| 90     | 1,500   | 1,56807 | 1,18293        | 2,751  | 1,1318       | 1,1032  | 0,3155                |
| 120    | 2,000   | 1,52589 | 1,15111        | 2,677  | 1,0745       | 1,0478  | 0,2863                |
| 150    | 2,500   | 1,48656 | 1,12144        | 2,608  | 1,0210       | 1,0059  | 0,1576                |
| 180    | 3,000   | 1,46433 | 1,10467        | 2,569  | 0,9908       | 0,9796  | 0,1155                |
| 210    | 3,500   | 1,4478  | 1,0922         | 2,54   | 0,9683       | 0,9590  | 0,0945                |
| 240    | 4,000   | 1,43412 | 1,08188        | 2,516  | 0,9497       | 0,9404  | 0,0936                |
| 270    | 4,500   | 1,42044 | 1,07156        | 2,492  | 0,9311       | 0,9218  | 0,0927                |
| 300    | 5,000   | 1,40676 | 1,06124        | 2,468  | 0,9125       | 0,9032  | 0,0918                |
| 330    | 5,500   | 1,39308 | 1,05092        | 2,444  | 0,8939       | 0,8866  | 0,0720                |
| 360    | 6,000   | 1,38225 | 1,04275        | 2,425  | 0,8792       | 0,8719  | 0,0714                |
| 390    | 6,500   | 1,37142 | 1,03458        | 2,406  | 0,8645       | 0,8571  | 0,0709                |
| 420    | 7,000   | 1,36059 | 1,02641        | 2,387  | 0,8498       | 0,8436  | 0,0592                |
| 450    | 7,500   | 1,35147 | 1,01953        | 2,371  | 0,8374       | 0,8312  | 0,0588                |
| 480    | 8,000   | 1,34235 | 1,01265        | 2,355  | 0,8250       | 0,8188  | 0,0584                |
| 510    | 8,500   | 1,33323 | 1,00577        | 2,339  | 0,8126       | 0,8079  | 0,0435                |
| 540    | 9,000   | 1,32639 | 1,00061        | 2,327  | 0,8033       |         |                       |

Tabla 25: Datos registrados para el secado solar de cacao sin zeolita.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg)  | ms(kg)         | m (kg) | wi (kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|----------|----------------|--------|--------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |          |                |        |              |         |                       |
| 0      | 0       | 1,71057  | <b>1,29043</b> | 3,001  | 1,3256       | 0,0473  | 0,2837                |
| 30     | 0,500   | 1,6758   | 1,2642         | 2,94   | 1,2783       | 0,0620  | 0,3645                |
| 60     | 1,000   | 1,6302   | 1,2298         | 2,86   | 1,2163       | 0,0612  | 0,3502                |
| 90     | 1,500   | 1,58517  | 1,19583        | 2,781  | 1,1551       | 0,0659  | 0,3664                |
| 120    | 2,000   | 1,53672  | 1,15928        | 2,696  | 1,0892       | 0,0519  | 0,2800                |
| 150    | 2,500   | 1,49853  | 1,13047        | 2,629  | 1,0373       | 0,0232  | 0,1222                |
| 180    | 3,000   | 1,48143  | 1,11757        | 2,599  | 1,0141       | 0,0225  | 0,1168                |
| 210    | 3,500   | 1,4649   | 1,1051         | 2,57   | 0,9916       | 0,0139  | 0,0717                |
| 240    | 4,000   | 1,45464  | 1,09736        | 2,552  | 0,9776       | 0,0139  | 0,0712                |
| 270    | 4,500   | 1,44438  | 1,08962        | 2,534  | 0,9637       | 0,0139  | 0,0707                |
| 300    | 5,000   | 1,43412  | 1,08188        | 2,516  | 0,9497       | 0,0116  | 0,0585                |
| 330    | 5,500   | 1,42557  | 1,07543        | 2,501  | 0,9381       | 0,0116  | 0,0581                |
| 360    | 6,000   | 1,41702  | 1,06898        | 2,486  | 0,9265       | 0,0116  | 0,0578                |
| 390    | 6,500   | 1,40847  | 1,06253        | 2,471  | 0,9149       | 0,0116  | 0,0574                |
| 420    | 7,000   | 1,39992  | 1,05608        | 2,456  | 0,9032       | 0,0101  | 0,0495                |
| 450    | 7,500   | 1,39251  | 1,05049        | 2,443  | 0,8932       | 0,0101  | 0,0492                |
| 480    | 8,000   | 1,3851   | 1,0449         | 2,43   | 0,8831       | 0,0101  | 0,0490                |
| 510    | 8,500   | 1,37769  | 1,03931        | 2,417  | 0,8730       | 0,0097  | 0,0468                |
| 540    | 9,000   | 1,370565 | 1,033935       | 2,4045 | 0,8633       |         |                       |

Las (Fig.63 y 64) ilustran gráficamente el cuarto escenario del experimento.

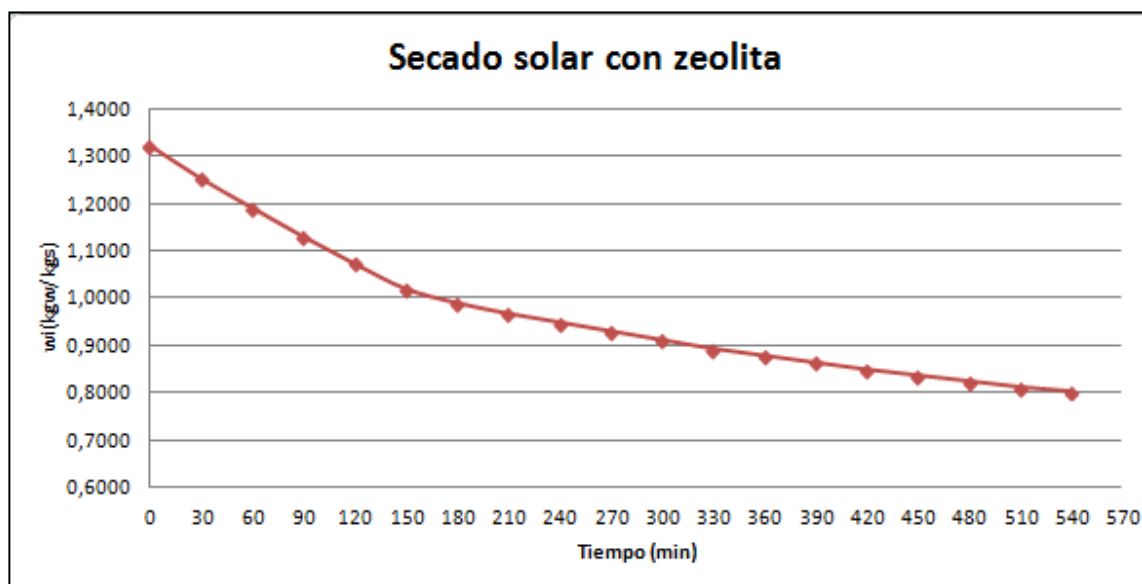


Fig.63: Gráfico de la curva de secado con 12kg de zeolita y el 5% de inclinación.

Fuente: Autor

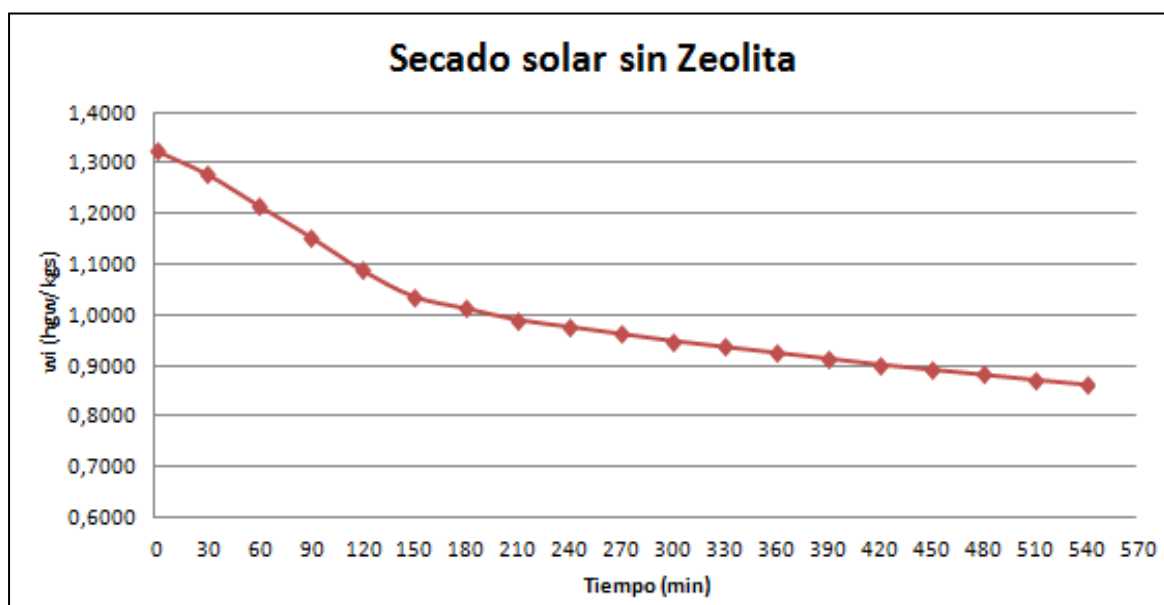


Fig.64: Gráfico de la curva de secado sin zeolita y el 5% de inclinación.

Fuente: Autor

A continuación se muestran los resultados de humedad y tiempo crítico calculados por linealización para el cuarto escenario.

Tabla 26: Intervalos y aproximaciones de humedades críticas y tiempos críticos de secado.

Fuente: Autor

| Secado solar con zeolita inclinacion 5% |                   |            |                     |              |          |
|---|-------------------|------------|---------------------|--------------|----------|
| Intervalos (min)                        | Rectas            | Pendientes | Cambio de pendiente | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
|   | y                 | y'         | Δm                  |              |          |
| 0-30                                    | y = -0,002x+1,325 | -0,002     |                     | 1,0745       | 120      |
| 30-60                                   | y = -0,002x+1,317 | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 60-90                                   | y=-0,002+1,315    | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 90-120                                  | y=-0,001+1,303    | -0,001     | -0,001              |              |          |
| 120-150                                 | y=-0,001+1,288    | -0,001     | 0,000               |              |          |
|   |                   |            |                     |              |          |
| Secado solar sin zeolita inclinacion 5% |                   |            |                     |              |          |
| Intervalos (min)                        | Rectas            | Pendientes | Cambio de pendiente | wc (kgw/kgs) | tc (min) |
|   | y                 | y'         | Δm                  |              |          |
| 0-30                                    | y = -0,001x+1,325 | -0,001     |                     | 1,0141       | 180      |
| 30-60                                   | y = -0,001x+1,340 | -0,001     | 0,000               |              |          |
| 60-90                                   | y=-0,002+1,338    | -0,002     | 0,001               |              |          |
| 90-120                                  | y=-0,002+1,352    | -0,002     | 0,000               |              |          |
| 120-150                                 | y=-0,001+1,296    | -0,001     | -0,001              |              |          |
| 150-180                                 | y=-0,0008+1,153   | -0,0008    | -0,0002             |              |          |
| 180-210                                 | y=-0,0008+1,176   | -0,0008    | 0,0000              |              |          |

Las tablas 27,28 y 29 muestran la estimación analítica de los tiempos alcanzados por el secador solar y secado en tendal en los períodos antecrítico, poscrítico y tiempo total de secado para los escenarios 1,2 y 3 respectivamente.

Tabla 27: Estimación del tiempo total de secado para un 5 % de inclinación.

Fuente: Autor

| Cálculo analítico del tiempo total de secado con el 5% de inclinación del secador |                                  |   |                              |                              |                                  |   |  |                                   |
|---|----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Período 1 de Secado   |                                  |   |                              |                              |                                  |   |  |                                   |
| masa m (kg)   | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 1 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad inicial wi (kgw/kgs) | Humedad Crítica wc (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 1 (h) |
| 3,002   | 1                                | 0,939   | 1,3256                       | 0,9429                       | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 1,22                              |

| Período 2 de Secado |                                  |   |                              |                             |                                  |   |  |                                   |   |
|---------------------|----------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|
| masa m (kg)         | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 2 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad crítica wc (kgw/kgs) | Humedad final wf* (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 2 (h) | Tiempo total de secado en período 1 y 2 (h) |
| 3,002               | 1                                | 0,1032  | 0,9429                       | 0,1736                      | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 22,38                             | 23,6  |

\* Humedad calculada de acuerdo a la isoterma de sorción del cacao mediante la ecuación de Halsey.

57 % Humedad inicial representa 1,3256 kgw/kgs , la humedad de equilibrio de 7,5% representa 0,1736 kgw/kgs de cacao

Tabla 28: Estimación del tiempo total de secado para un 15 % de inclinación.

Fuente: Autor

**Cálculo analítico del tiempo total de secado con el 15% de inclinación del secador**

| <b>Período 1 de Secado</b> |                                  |   |                              |                              |                                  |   |  |                                   |
|----------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| masa m (kg)                | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 1 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad inicial wi (kgw/kgs) | Humedad Crítica wc (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 1 (h) |
| 3,003                      | 1                                | 0,7279  | 1,3256                       | 0,8664                       | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 1,89                              |

| <b>Período 2 de Secado</b> |                                  |   |                              |                             |                                  |   |  |                                   |   |
|----------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|
| masa m (kg)                | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 2 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad crítica wc (kgw/kgs) | Humedad final wf* (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 2 (h) | Tiempo total de secado en período 1 y 2 (h) |
| 3,003                      | 1                                | 0,079   | 0,8664                       | 0,1736                      | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 26,34                             | 28,23                                       |

\* Humedad calculada de acuerdo a la isoterma de sorción del cacao mediante la ecuación de Halsey.

57 % Humedad inicial representa 1,3256 kgw/kgs , la humedad de equilibrio de 7,5% representa 0,1736 kgw/kgs de cacao

Tabla 29: Estimación del tiempo total de secado en tendal.

Fuente: Autor

**Cálculo analítico del tiempo total de secado solar en tendal**

| <b>Período 1 de Secado</b> |                                  |   |                              |                              |                                  |   |  |                                   |
|----------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| masa m (kg)                | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 1 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad inicial wi (kgw/kgs) | Humedad Crítica wc (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 1 (h) |
| 3,003                      | 1                                | 0,3852  | 1,3256                       | 0,6975                       | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 4,9                               |

| <b>Período 2 de Secado</b> |                                  |   |                              |                             |                                  |   |  |                                   |   |
|----------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|
| masa m (kg)                | Area de secado (m <sup>2</sup> ) | Velocidad media período 2 (kg/hm <sup>2</sup> ) | Humedad crítica wc (kgw/kgs) | Humedad final wf* (kgw/kgs) | Temp. Promedio del ambiente (°C) | Hum. Relativa promedio del ambiente (%) | Humedad de equilibrio del producto (%) | Tiempo de secado en período 2 (h) | Tiempo total de secado en período 1 y 2 (h) |
| 3,003                      | 1                                | 0,0232  | 0,6975                       | 0,1736                      | 25,1                             | 68,52                                   | 7,5                                    | 67,81                             | 72,71                                       |

\* Humedad calculada de acuerdo a la isoterma de sorción del cacao mediante la ecuación de Halsey.

57 % Humedad inicial representa 1,3256 kgw/kgs , la humedad de equilibrio de 7,5% representa 0,1736 kgw/kgs de cacao

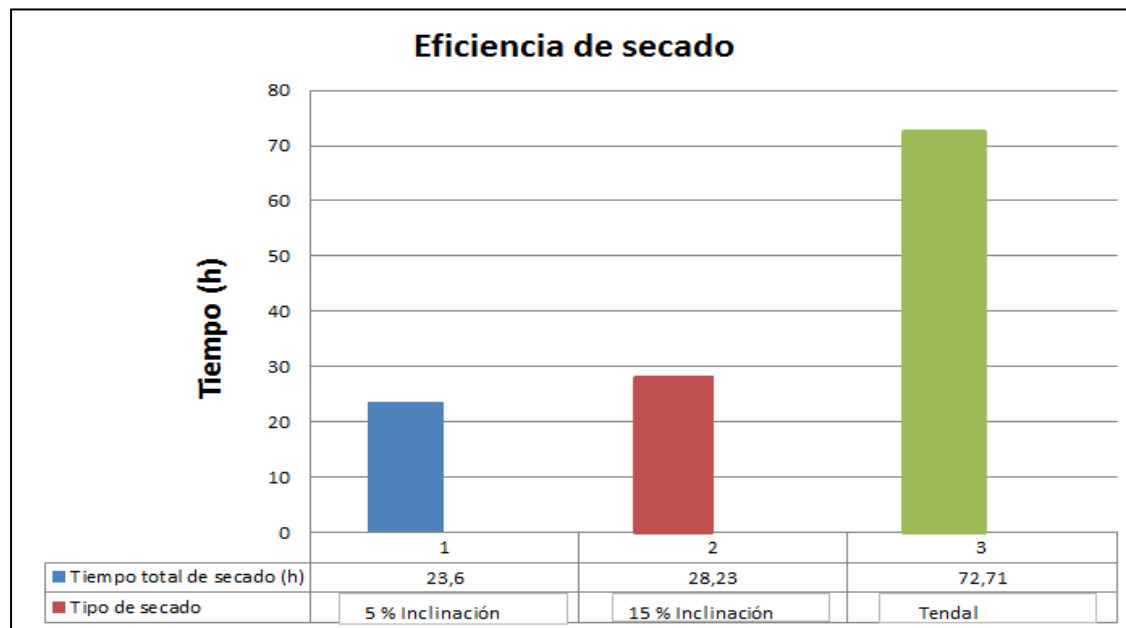


Fig.65: Tiempo total de secado para cada escenario.

Fuente: Autor

La (Fig. 65) muestra el tiempo estimado para secar cacao CCN51 aplicando tres escenarios distintos, en donde se observa que el secador solar inclinado un 5% y con absorbedor de zeolita resulta más eficiente que los otros tipos de secado, puesto que se necesitará alrededor de 1 día para conseguir reducir la humedad hasta condiciones que equilibrio, cosa que el secado en tendal se tarda 3 días aproximadamente. Ahora, esta estimación se la realizó en forma analítica, por consiguiente representa un tiempo aproximado de secado, el cual debe ser corroborado en una medición real.

La tabla adjunta muestra los valores medidos en el quinto escenario de secado solar hasta alcanzar la humedad de equilibrio del producto, sin cálculo analítico.

Tabla 30: Datos registrados para el secado solar en la experiencia real con el 5% de inclinación.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg)  | m (kg) | wi (kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|---------|--------|--------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |         |        |              |         |                       |
| 0      | 0       | 1,14114 | 0,86086 | 2,002  | 1,3256       | 1,1502  | 1,4047                |
| 60     | 1       | 0,969   | 0,731   | 1,7    | 0,9748       | 0,9167  | 0,3950                |
| 120    | 2       | 0,912   | 0,688   | 1,6    | 0,8586       | 0,8121  | 0,2974                |

|      |    |         |         |       |        |        |        |
|------|----|---------|---------|-------|--------|--------|--------|
| 180  | 3  | 0,8664  | 0,6536  | 1,52  | 0,7657 | 0,7134 | 0,3178 |
| 240  | 4  | 0,8151  | 0,6149  | 1,43  | 0,6611 | 0,6147 | 0,2658 |
| 300  | 5  | 0,7695  | 0,5805  | 1,35  | 0,5682 | 0,5275 | 0,2195 |
| 360  | 6  | 0,7296  | 0,5504  | 1,28  | 0,4869 | 0,4346 | 0,2676 |
| 420  | 7  | 0,6783  | 0,5117  | 1,19  | 0,3823 | 0,3591 | 0,1106 |
| 480  | 8  | 0,6555  | 0,4945  | 1,15  | 0,3359 | 0,3184 | 0,0802 |
| 540  | 9  | 0,6384  | 0,4816  | 1,12  | 0,3010 | 0,2836 | 0,0781 |
| 600  | 10 | 0,6213  | 0,4687  | 1,09  | 0,2662 | 0,2546 | 0,0506 |
| 660  | 11 | 0,6099  | 0,4601  | 1,07  | 0,2429 | 0,2400 | 0,0124 |
| 720  | 12 | 0,60705 | 0,45795 | 1,065 | 0,2371 | 0,2342 | 0,0124 |
| 780  | 13 | 0,6042  | 0,4558  | 1,06  | 0,2313 | 0,2278 | 0,0148 |
| 840  | 14 | 0,60078 | 0,45322 | 1,054 | 0,2244 | 0,2238 | 0,0024 |
| 900  | 15 | 0,60021 | 0,45279 | 1,053 | 0,2232 | 0,2220 | 0,0049 |
| 960  | 16 | 0,59907 | 0,45193 | 1,051 | 0,2209 | 0,2197 | 0,0049 |
| 1020 | 17 | 0,59793 | 0,45107 | 1,049 | 0,2185 | 0,2116 | 0,0292 |
| 1080 | 18 | 0,59109 | 0,44591 | 1,037 | 0,2046 | 0,2040 | 0,0024 |
| 1140 | 19 | 0,59052 | 0,44548 | 1,036 | 0,2034 | 0,2023 | 0,0048 |
| 1200 | 20 | 0,58938 | 0,44462 | 1,034 | 0,2011 | 0,1994 | 0,0072 |
| 1260 | 21 | 0,58767 | 0,44333 | 1,031 | 0,1976 | 0,1976 | 0,0000 |
| 1320 | 22 | 0,58767 | 0,44333 | 1,031 | 0,1976 | 0,1971 | 0,0024 |
| 1380 | 23 | 0,5871  | 0,4429  | 1,03  | 0,1965 | 0,1959 | 0,0024 |
| 1440 | 24 | 0,58653 | 0,44247 | 1,029 | 0,1953 | 0,1942 | 0,0048 |
| 1500 | 25 | 0,58539 | 0,44161 | 1,027 | 0,1930 | 0,1924 | 0,0024 |
| 1560 | 26 | 0,58482 | 0,44118 | 1,026 | 0,1918 | 0,1907 | 0,0048 |
| 1620 | 27 | 0,58368 | 0,44032 | 1,024 | 0,1895 | 0,1883 | 0,0048 |
| 1680 | 28 | 0,58254 | 0,43946 | 1,022 | 0,1872 | 0,1831 | 0,0166 |
| 1740 | 29 | 0,57855 | 0,43645 | 1,015 | 0,1791 | 0,0895 |        |

Tabla 31: Datos registrados para el secado solar en la experiencia real en tendal.

Fuente: Autor

| Tiempo |         | mw (kg) | ms(kg) | m (kg) | wi (kgw/kgs) | w media | V kg/h.m <sup>2</sup> |
|--------|---------|---------|--------|--------|--------------|---------|-----------------------|
| (min)  | (Horas) |         |        |        |              |         |                       |
| 0      | 0       | 1,14    | 0,86   | 2      | 1,3233       | 1,2129  | 0,8828                |
| 60     | 1       | 1,0317  | 0,7783 | 1,81   | 1,1025       | 1,0387  | 0,4626                |
| 120    | 2       | 0,969   | 0,731  | 1,7    | 0,9748       | 0,9225  | 0,3555                |
| 180    | 3       | 0,9177  | 0,6923 | 1,61   | 0,8702       | 0,8005  | 0,4489                |
| 240    | 4       | 0,8493  | 0,6407 | 1,49   | 0,7308       | 0,7076  | 0,1385                |
| 300    | 5       | 0,8265  | 0,6235 | 1,45   | 0,6844       | 0,6321  | 0,3032                |



|      |    |         |        |       |        |        |        |
|------|----|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 360  | 6  | 0,7752  | 0,5848 | 1,36  | 0,5798 | 0,5566 | 0,1264 |
| 420  | 7  | 0,7524  | 0,5676 | 1,32  | 0,5334 | 0,5101 | 0,1227 |
| 480  | 8  | 0,7296  | 0,5504 | 1,28  | 0,4869 | 0,4695 | 0,0892 |
| 540  | 9  | 0,7125  | 0,5375 | 1,25  | 0,4520 | 0,4288 | 0,1162 |
| 600  | 10 | 0,6897  | 0,5203 | 1,21  | 0,4056 | 0,3823 | 0,1124 |
| 660  | 11 | 0,6669  | 0,5031 | 1,17  | 0,3591 | 0,3533 | 0,0272 |
| 720  | 12 | 0,6612  | 0,4988 | 1,16  | 0,3475 | 0,3359 | 0,0539 |
| 780  | 13 | 0,6498  | 0,4902 | 1,14  | 0,3243 | 0,3155 | 0,0397 |
| 840  | 14 | 0,64125 | 0,4837 | 1,125 | 0,3068 | 0,3004 | 0,0288 |
| 900  | 15 | 0,63498 | 0,4790 | 1,114 | 0,2941 | 0,2888 | 0,0233 |
| 960  | 16 | 0,62985 | 0,4751 | 1,105 | 0,2836 | 0,2824 | 0,0051 |
| 1020 | 17 | 0,62871 | 0,4742 | 1,103 | 0,2813 | 0,2801 | 0,0051 |
| 1080 | 18 | 0,62757 | 0,4734 | 1,101 | 0,2790 | 0,2778 | 0,0051 |
| 1140 | 19 | 0,62643 | 0,4725 | 1,099 | 0,2766 | 0,2755 | 0,0051 |
| 1200 | 20 | 0,62529 | 0,4717 | 1,097 | 0,2743 | 0,2731 | 0,0051 |
| 1260 | 21 | 0,62415 | 0,4708 | 1,095 | 0,2720 | 0,2708 | 0,0051 |
| 1320 | 22 | 0,62301 | 0,4699 | 1,093 | 0,2697 | 0,2685 | 0,0051 |
| 1380 | 23 | 0,62187 | 0,4691 | 1,091 | 0,2673 | 0,2662 | 0,0051 |
| 1440 | 24 | 0,62073 | 0,4682 | 1,089 | 0,2650 | 0,2639 | 0,0051 |
| 1500 | 25 | 0,61959 | 0,4674 | 1,087 | 0,2627 | 0,2615 | 0,0051 |
| 1560 | 26 | 0,61845 | 0,4665 | 1,085 | 0,2604 | 0,2592 | 0,0050 |
| 1620 | 27 | 0,61731 | 0,4656 | 1,083 | 0,2580 | 0,2569 | 0,0050 |
| 1680 | 28 | 0,61617 | 0,4648 | 1,081 | 0,2557 | 0,2546 | 0,0050 |
| 1740 | 29 | 0,61503 | 0,4639 | 1,079 | 0,2534 | 0,2522 | 0,0050 |
| 1800 | 30 | 0,61389 | 0,4631 | 1,077 | 0,2511 | 0,2499 | 0,0050 |
| 1860 | 31 | 0,61275 | 0,4622 | 1,075 | 0,2488 | 0,2470 | 0,0075 |
| 1920 | 32 | 0,61104 | 0,4609 | 1,072 | 0,2453 | 0,2441 | 0,0050 |
| 1980 | 33 | 0,6099  | 0,4601 | 1,07  | 0,2429 | 0,2418 | 0,0050 |
| 2040 | 34 | 0,60876 | 0,4592 | 1,068 | 0,2406 | 0,2395 | 0,0050 |
| 2100 | 35 | 0,60762 | 0,4583 | 1,066 | 0,2383 | 0,2371 | 0,0050 |
| 2160 | 36 | 0,60648 | 0,4575 | 1,064 | 0,2360 | 0,2348 | 0,0049 |
| 2220 | 37 | 0,60534 | 0,4566 | 1,062 | 0,2337 | 0,2325 | 0,0049 |
| 2280 | 38 | 0,6042  | 0,4558 | 1,06  | 0,2313 | 0,2302 | 0,0049 |
| 2340 | 39 | 0,60306 | 0,4549 | 1,058 | 0,2290 | 0,2278 | 0,0049 |
| 2400 | 40 | 0,60192 | 0,4540 | 1,056 | 0,2267 | 0,2255 | 0,0049 |
| 2460 | 41 | 0,60078 | 0,4532 | 1,054 | 0,2244 | 0,2232 | 0,0049 |
| 2520 | 42 | 0,59964 | 0,4523 | 1,052 | 0,2220 | 0,2209 | 0,0049 |
| 2580 | 43 | 0,5985  | 0,4515 | 1,05  | 0,2197 | 0,2185 | 0,0049 |



|      |    |          |        |       |        |        |        |
|------|----|----------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 2640 | 44 | 0,59736  | 0,4506 | 1,048 | 0,2174 | 0,2162 | 0,0049 |
| 2700 | 45 | 0,59622  | 0,4497 | 1,046 | 0,2151 | 0,2139 | 0,0049 |
| 2760 | 46 | 0,59508  | 0,4489 | 1,044 | 0,2127 | 0,2116 | 0,0049 |
| 2820 | 47 | 0,59394  | 0,4480 | 1,042 | 0,2104 | 0,2093 | 0,0048 |
| 2880 | 48 | 0,5928   | 0,4472 | 1,04  | 0,2081 | 0,2069 | 0,0048 |
| 2940 | 49 | 0,59166  | 0,4463 | 1,038 | 0,2058 | 0,2046 | 0,0048 |
| 3000 | 50 | 0,59052  | 0,4454 | 1,036 | 0,2034 | 0,2023 | 0,0048 |
| 3060 | 51 | 0,58938  | 0,4446 | 1,034 | 0,2011 | 0,2000 | 0,0048 |
| 3120 | 52 | 0,58824  | 0,4437 | 1,032 | 0,1988 | 0,1976 | 0,0048 |
| 3180 | 53 | 0,5871   | 0,4429 | 1,03  | 0,1965 | 0,1953 | 0,0048 |
| 3240 | 54 | 0,58596  | 0,4420 | 1,028 | 0,1942 | 0,1933 | 0,0036 |
| 3300 | 55 | 0,585105 | 0,4413 | 1,027 | 0,1924 | 0,1915 | 0,0036 |
| 3360 | 56 | 0,58425  | 0,4407 | 1,025 | 0,1907 | 0,1898 | 0,0036 |
| 3420 | 57 | 0,583395 | 0,4401 | 1,024 | 0,1889 | 0,1881 | 0,0036 |
| 3480 | 58 | 0,58254  | 0,4394 | 1,022 | 0,1872 | 0,1866 | 0,0024 |
| 3540 | 59 | 0,58197  | 0,4390 | 1,021 | 0,1860 | 0,1854 | 0,0024 |
| 3600 | 60 | 0,5814   | 0,4386 | 1,02  | 0,1849 | 0,1843 | 0,0024 |
| 3660 | 61 | 0,58083  | 0,4381 | 1,019 | 0,1837 | 0,1831 | 0,0024 |
| 3720 | 62 | 0,58026  | 0,4377 | 1,018 | 0,1825 | 0,1820 | 0,0024 |
| 3780 | 63 | 0,57969  | 0,4373 | 1,017 | 0,1814 | 0,1808 | 0,0024 |
| 3840 | 64 | 0,57912  | 0,4368 | 1,016 | 0,1802 | 0,1791 | 0,0047 |
| 3900 | 65 | 0,57798  | 0,4360 | 1,014 | 0,1779 | 0,0889 |        |

Las (Fig. 66 y 67) ilustran gráficamente el quinto escenario del experimento, es decir valores registrados sin cálculo analítico.

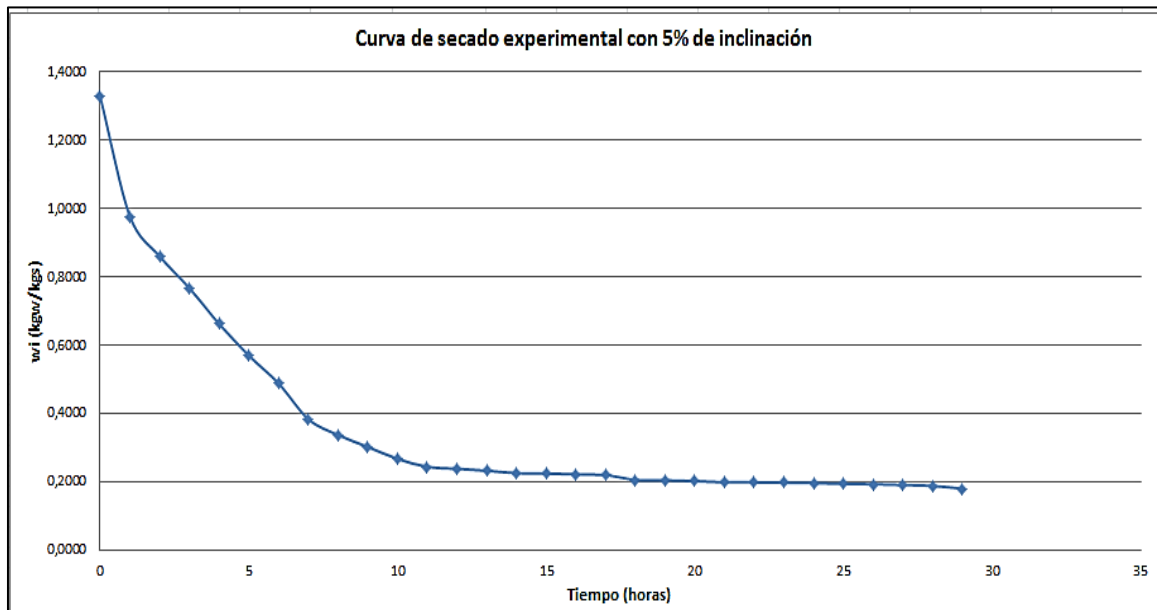


Fig.66: Curva de secado real para una inclinación del 5%.

Fuente: Autor

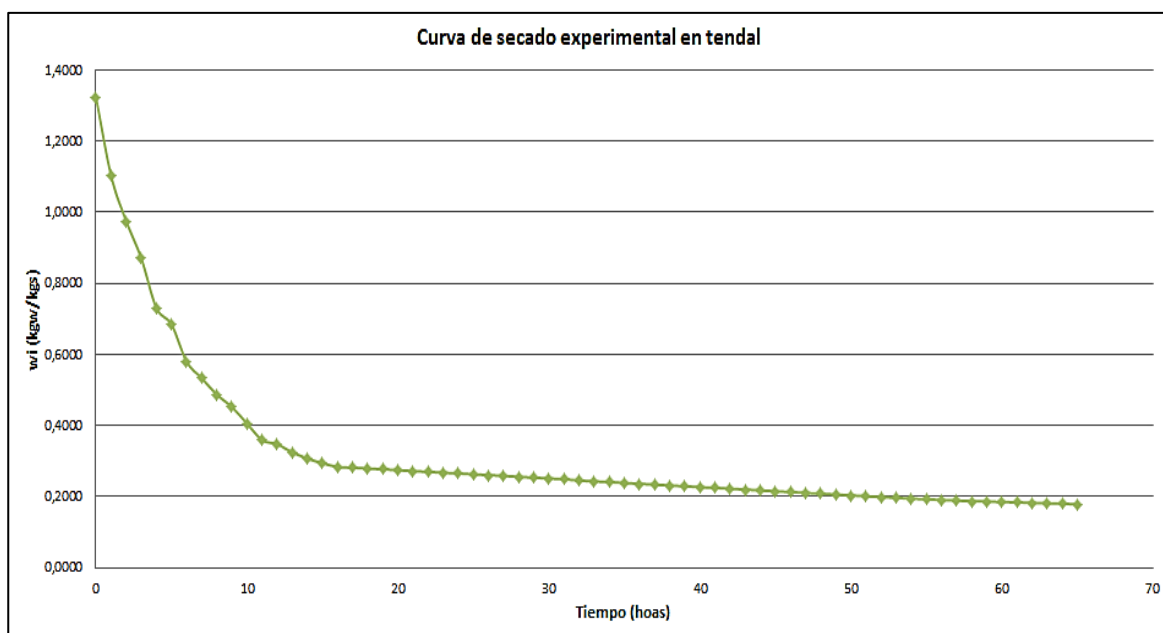


Fig.67: Curva de secado real para el secado solar en tendal.

Fuente: Autor

A continuación se muestran los resultados de humedad relativa medidos en cada ambiente del secador solar en intervalos de 30 minutos.

Tabla 32: Humedades relativas influyentes en el secador solar.

Fuente: Autor

| Fecha       | Hora  | % HR Ambiente | % HR Zeolita | % HR Cacao |
|-------------|-------|---------------|--------------|------------|
| 25/12/ 2012 | 21:30 | 79            | 75           | 77         |
|             | 22:30 | 84            | 87           | 83         |
|             | 23:30 | 85            | 87           | 85         |
| 26/12/2012  | 0:30  | 86            | 88           | 85         |
|             | 1:30  | 87            | 89           | 88         |
|             | 2:30  | 89            | 89           | 87         |
|             | 3:30  | 88            | 88           | 87         |
|             | 4:30  | 89            | 88           | 87         |
|             | 5:30  | 88            | 89           | 86         |
|             | 6:30  | 86            | 87           | 86         |
|             | 7:30  | 86            | 85           | 82         |
|             | 8:30  | 81            | 83           | 82         |
|             | 9:30  | 70            | 68           | 72         |
|             | 10:30 | 64            | 62           | 64         |
|             | 11:30 | 43            | 45           | 41         |
|             | 12:30 | 30            | 36           | 29         |
|             | 13:30 | 20            | 22           | 22         |
|             | 14:30 | 19            | 22           | 21         |
|             | 15:30 | 24            | 25           | 24         |
|             | 16:30 | 32            | 34           | 29         |
|             | 17:30 | 40            | 44           | 40         |
|             | 18:30 | 53            | 53           | 51         |
|             | 19:30 | 59            | 60           | 58         |
|             | 20:30 | 61            | 64           | 61         |
|             | 21:30 | 65            | 65           | 64         |
|             | 22:30 | 67            | 72           | 70         |
|             | 23:30 | 70            | 74           | 71         |
| 27/12/ 2012 | 0:30  | 74            | 75           | 72         |
|             | 1:30  | 76            | 76           | 72         |
|             | 2:30  | 79            | 77           | 74         |
|             | 3:30  | 81            | 77           | 74         |
|             | 4:30  | 82            | 78           | 76         |
|             | 5:30  | 82            | 78           | 76         |
|             | 6:30  | 75            | 77           | 72         |
|             | 7:30  | 75            | 75           | 71         |
|             | 8:30  | 71            | 75           | 74         |
|             | 9:30  | 59            | 60           | 64         |
|             | 10:30 | 43            | 47           | 52         |
|             | 11:30 | 35            | 42           | 47         |
|             | 12:30 | 28            | 34           | 32         |
|             | 13:30 | 22            | 30           | 29         |
|             | 14:30 | 23            | 24           | 22         |
|             | 15:30 | 21            | 23           | 23         |
|             | 16:30 | 23            | 29           | 24         |
|             | 17:30 | 37            | 40           | 36         |
|             | 18:30 | 50            | 52           | 50         |
|             | 19:30 | 61            | 64           | 61         |
|             | 20:30 | 65            | 65           | 64         |
|             | 21:30 | 69            | 72           | 70         |
|             | 22:30 | 72            | 74           | 71         |
|             | 23:30 | 74            | 75           | 72         |
| 28/12/2012  | 0:30  | 77            | 80           | 75         |
|             | 1:30  | 82            | 81           | 76         |
|             | 2:30  | 81            | 80           | 77         |
|             | 3:30  | 82            | 79           | 77         |
|             | 4:30  | 84            | 78           | 75         |
|             | 5:30  | 81            | 77           | 75         |



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*

|  |      |    |    |    |
|--|------|----|----|----|
|  | 6:30 | 78 | 75 | 73 |
|--|------|----|----|----|

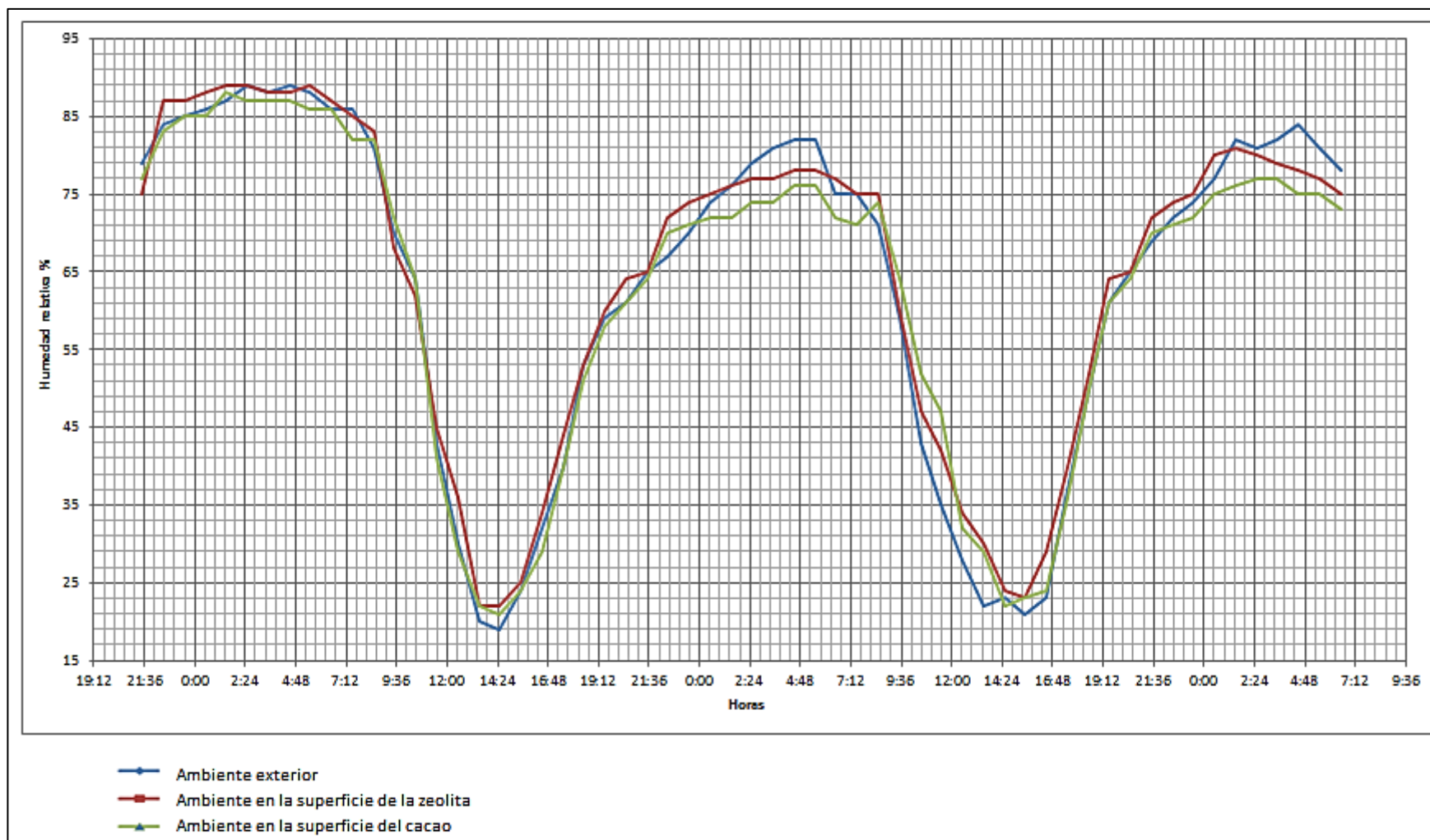


Fig.68: Gráfico de ambientes influyentes en el secador solar.



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

Fuente: Autor

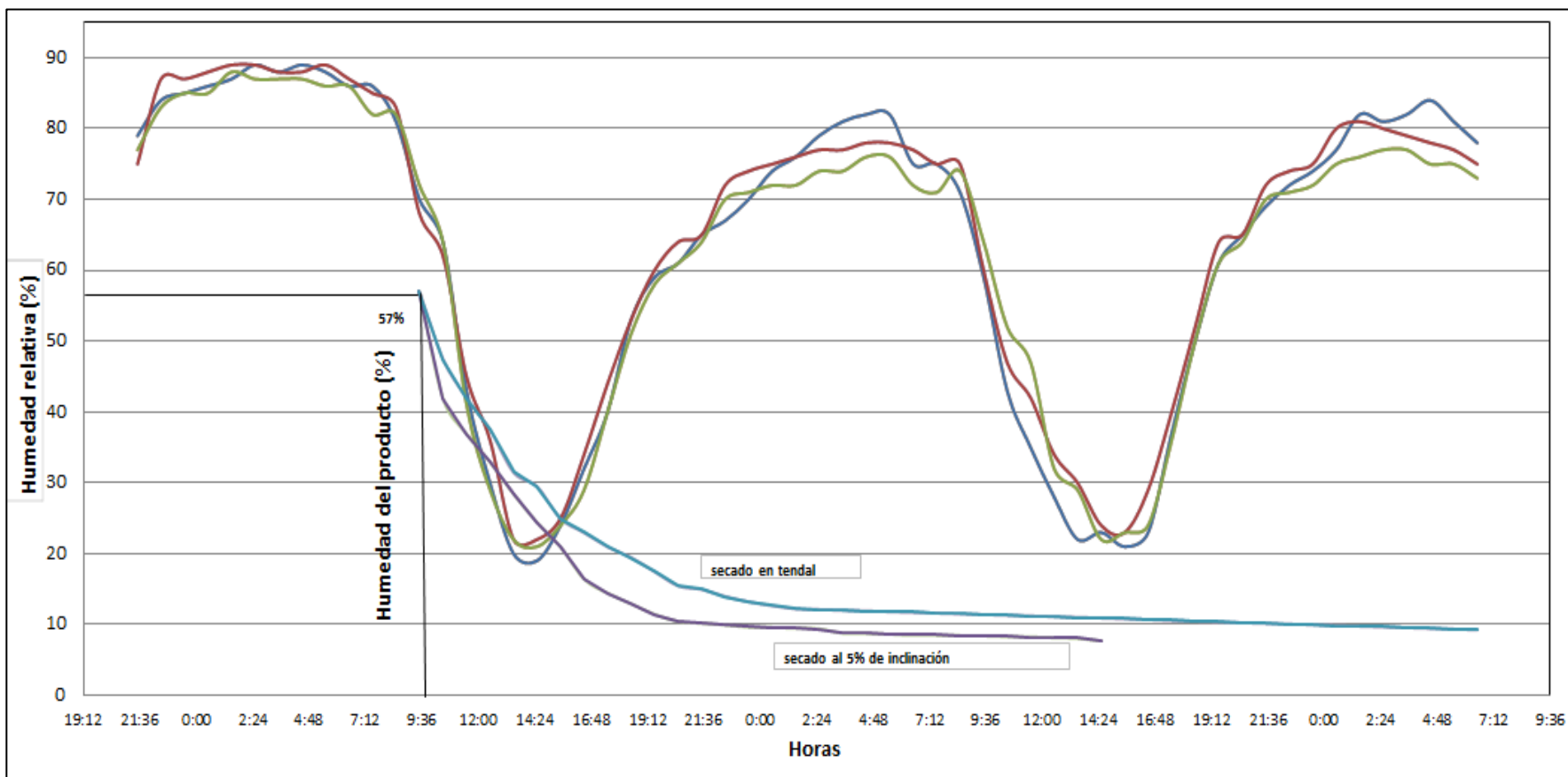


Fig.69: Gráfico comparativo entre ambientes influyentes en el secador solar y descenso de humedad porcentual del producto.



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*

Fuente: Autor



Las (Fig. 68 y 69) muestran el comportamiento de tres ambientes distintos en el proceso de secado solar inclinado con absorbedor de zeolita, un ambiente exterior que indica el % de humedad relativa externa, un segundo ambiente en la superficie de secado de cacao y un tercer ambiente en la superficie de la zeolita, donde el objetivo principal es observar el comportamiento de hidratación y deshidratación de la zeolita respecto a los otros ambientes.

La experiencia empieza según lo indicado en la tabla 32, el 25 de Diciembre a las 21h30, y finaliza el 28 de Diciembre a las 6h30, para esto se realizaron mediciones cada hora, de donde se observa que al principio el cacao presenta una humedad mayor respecto a la humedad de la zeolita; a partir de aquí la zeolita aumenta su humedad relativa a lo largo de la noche como también lo hace la humedad exterior y la del cacao, sin embargo se observa una mayor hidratación de la zeolita respecto a la humedad del cacao a partir de las 22h30, en donde la humedad se incrementa un 2% aproximadamente en relación a la humedad del cacao, luego en la mañana por la influencia de la radiación solar la humedad exterior desciende y con ella la zeolita como el cacao sufren deshidratación alcanzando un máximo alrededor de las 14h00, en donde la humedad empieza a subir según se incrementa la humedad exterior, este comportamiento se repite los días posteriores, aunque con distinto valor de humedades pero con igual tendencia, es decir en la noche existe una mayor hidratación de la zeolita respecto al cacao y en la mañana se deshidratan los dos productos, de donde se establece el proceso cíclico de absorción y deshidratación de la zeolita dentro del proceso.

En cuanto a los resultados obtenidos en el diseño experimental utilizando Statgraphics la (Fig. 70) presenta la matriz de variable respuesta durante la iteración inclinación-tiempo con una réplica en un diseño factorial  $2^k$ .



| BLOQUE | INCLINACION | TIEMPO | HUMEDAD (wi) |
|--------|-------------|--------|--------------|
|        | °           | h      | kgw/kgs      |
| 1      | 15,0        | 3,0    | 0,6743       |
| 1      | 5,0         | 9,0    | 0,5873       |
| 1      | 5,0         | 3,0    | 0,6687       |
| 1      | 15,0        | 9,0    | 0,6030       |
| 2      | 15,0        | 3,0    | 0,6743       |
| 2      | 5,0         | 9,0    | 0,5873       |
| 2      | 5,0         | 3,0    | 0,6687       |
| 2      | 15,0        | 9,0    | 0,6030       |

Fig.70: Matriz de variable respuesta para la iteración inclinación- tiempo con una réplica.

Fuente: Autor

Tabla 33: Análisis de varianza para humedad (wi) respecto de A: Inclinación, B: Tiempo, e iteración AB.

Fuente: Autor

**Análisis de Varianza para HUMEDAD (wi)**

| Fuente        | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:INCLINACION | 0,000226845       | 1  | 0,000226845    |         |         |
| B:TIEMPO      | 0,0116586         | 1  | 0,0116586      |         |         |
| AB            | 0,000051005       | 1  | 0,000051005    |         |         |
| bloques       | 0,0               | 1  | 0,0            |         |         |
| Error total   | 0,0               | 3  | 0,0            |         |         |
| Total (corr.) | 0,0119365         | 7  |                |         |         |

R-cuadrada = 100,0 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 100,0 %

Error estándar del est. = 0,0

Error absoluto medio = 0,0

La tabla 33 o ANOVA particiona la variabilidad de HUMEDAD (wi) en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100,0% de la variabilidad en HUMEDAD ( $w_i$ ). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 100,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0. El error medio absoluto (MAE) de 0,0 es el valor promedio de los residuos.

Sin embargo al no tener grados de libertad, no se puede determinar el error estándar en el experimento así como tampoco el valor p, que presenta la significancia del efecto dentro del experimento, por esta razón se debe excluir aquel factor que parece no incidir dentro del experimento, esto se lo hace de acuerdo al diagrama de Pareto (Fig.71), en donde el efecto AB parece no incidir.

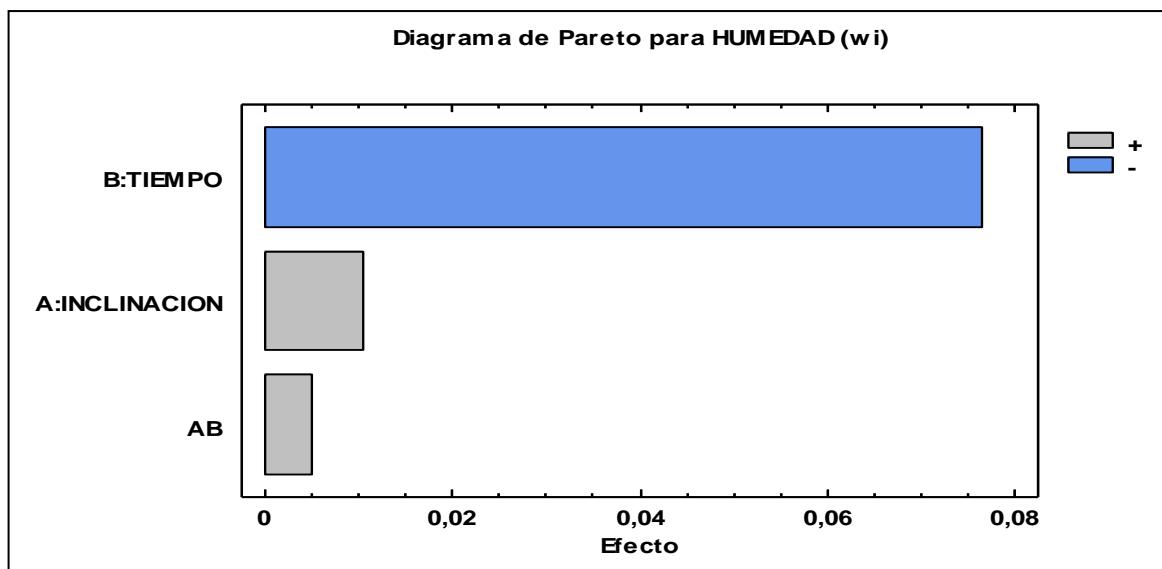


Fig.71: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración inclinación- tiempo.

Fuente: Autor

Tabla 34: Análisis de varianza para humedad ( $w_i$ ) respecto de A: Inclinación, B: Tiempo, excluida la iteración AB.

Fuente: Autor

Análisis de Varianza para HUMEDAD (wi)

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| A:INCLINACION | 0,000226845              | 1         | 0,000226845           | 17,79          | 0,0135         |
| B:TIEMPO      | 0,0116586                | 1         | 0,0116586             | 914,31         | 0,0000         |
| bloques       | 0,0                      | 1         | 0,0                   | 0,00           | 1,0000         |
| Error total   | 0,000051005              | 4         | 0,0000127513          |                |                |
| Total (corr.) | 0,0119365                | 7         |                       |                |                |

R-cuadrada = 99,5727 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,2522 porciento

Error estándar del est. = 0,00357089

Error absoluto medio = 0,002525

Estadístico Durbin-Watson = 1,5 (P=0,2346)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,125

La tabla 34 particiona la variabilidad de HUMEDAD (wi) en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99,5727% de la variabilidad en HUMEDAD (wi). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,2522%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,00357089. El error medio absoluto (MAE) de 0,002525 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

La tabla 35 muestra los coeficientes de regresión para el modelo matemático obtenido por statgraphics para la iteración inclinación- tiempo.

Tabla 35: Coeficientes de regresión para determinar la ecuación del modelo matemático.

Fuente: Autor

**Coef. de regresión para humedad**

| <i>Coeficiente</i> | <i>Estimado</i> |
|--------------------|-----------------|
| constante          | 0,699025        |
| A:incl             | 0,001065        |
| B:tiempo           | -0,012725       |

La ecuación del modelo ajustado es

$$wi = 0,699025 + 0,001065I - 0,012725T \quad (4.5)$$

Donde:

$$wi = \text{Humedad} \left( \frac{kgw}{kgs} \right)$$

$$I = \text{Inclinacion del secador} (\%)$$

$$T = \text{Tiempo} (h)$$

Tabla 36: Trayectoria de máxima pendiente para humedad respecto de Inclinación y tiempo.

Fuente: Autor

**Camino de Máximo Ascenso para HUMEDAD (wi)**

|                    |               | <i>Predicción para</i> |
|--------------------|---------------|------------------------|
| <i>INCLINACION</i> | <i>TIEMPO</i> | <i>HUMEDAD (wi)</i>    |
| <i>(%)</i>         | <i>(h)</i>    | <i>(kgw/kgs)</i>       |
| 10,0               | 6,0           | 0,633325               |
| 11,0               | 0,116842      | 0,708263               |
| 12,0               | -6,68779      | 0,792636               |
| 13,0               | -0,392009     | 0,71463                |
| 14,0               | 61,9774       | -0,0370366             |
| 15,0               | 61,5653       | -0,0216508             |



La tabla 36 indica la trayectoria de máxima pendiente o trayecto de máximo ascenso (o descenso). Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar o reducir HUMEDAD ( $w_i$ ). Actualmente, 6 puntos se han generado cambiando INCLINACION en incrementos de 1,0 %.

Puede especificarse la cantidad de cambio en cualquiera de los factores presionando el botón secundario del ratón y seleccionando Opciones de Ventana. STATGRAPHICS determinará entonces cuanto tendrán que cambiar los otros factores para mantenerse en el trayecto del máximo ascenso.

El programa también calcula la HUMEDAD ( $w_i$ ) estimada en cada uno de los puntos del trayecto, con los cuales pueden compararse los resultados si es que se corren esos ensayos.

La (Fig. 72) muestra el diagrama de Pareto para la iteración inclinación- tiempo excluida la iteración AB, que no influyó en el análisis. Mientras que las (Fig. 73 y 74) muestran el gráfico de superficie respuesta estimada y contornos de superficie estimada respectivamente.

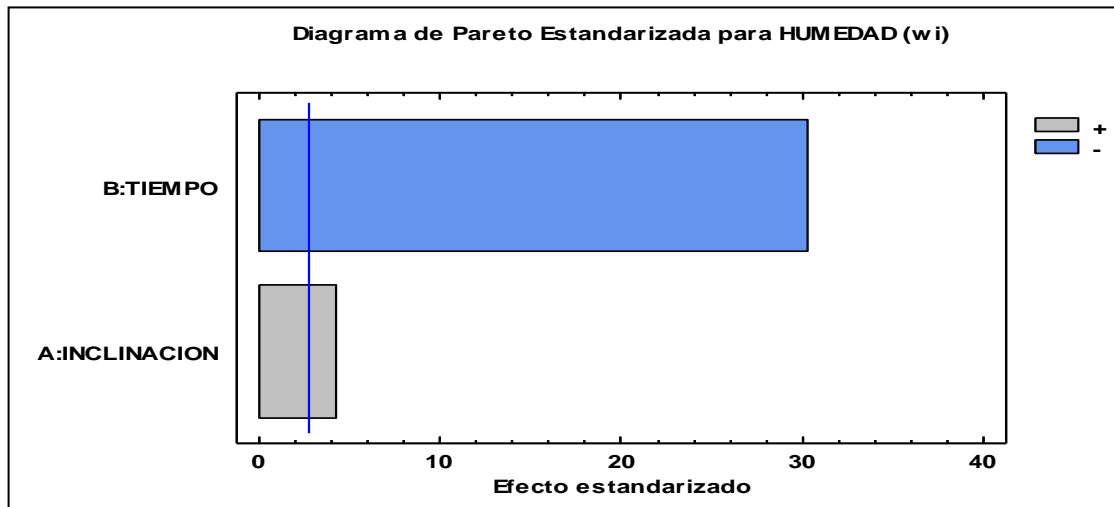


Fig.72: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración inclinación- tiempo, excluye iteración AB.

Fuente: Autor

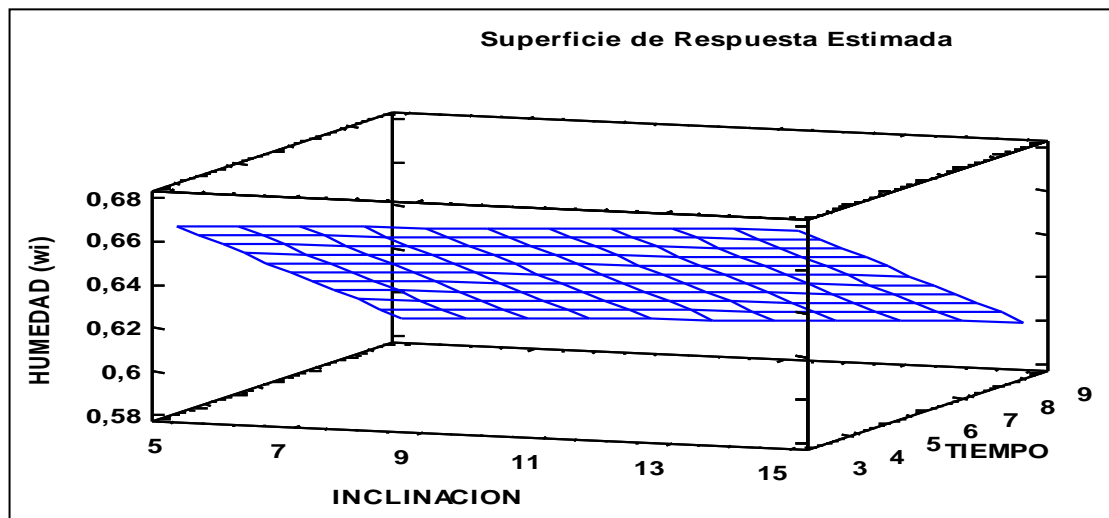


Fig.73: Grafico de superficie de respuesta estimada.

Fuente: Autor

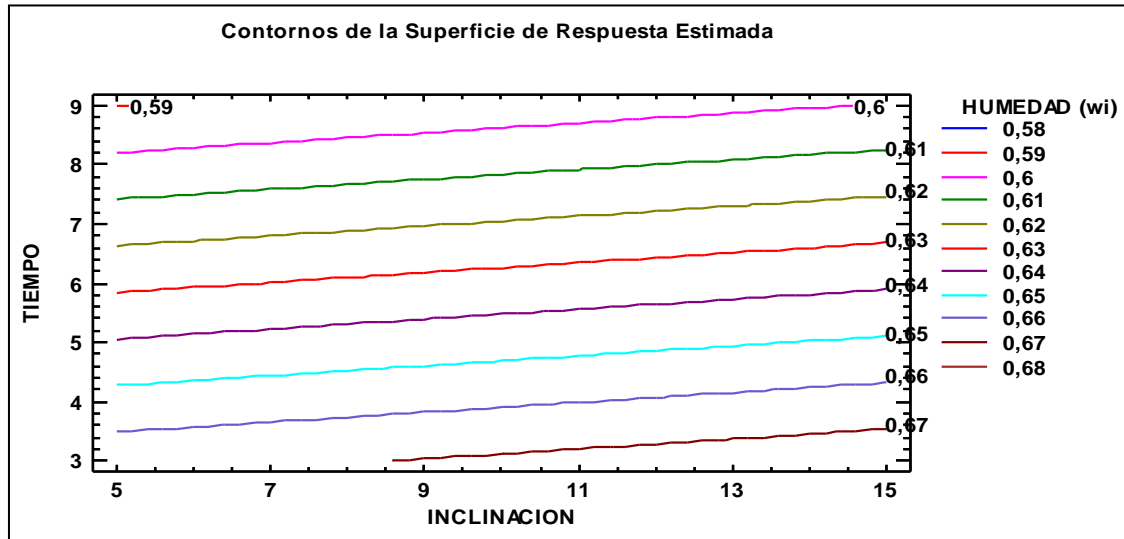


Fig.74: Grafico de contornos de superficie respuesta estimada.

Fuente: Autor

La (Fig. 75) muestra los efectos en humedad producidos por cada variable dentro del experimento, en la iteración inclinación –tiempo, de donde se observa que las dos variables inciden en el proceso de secado, cada una en diferente grado.

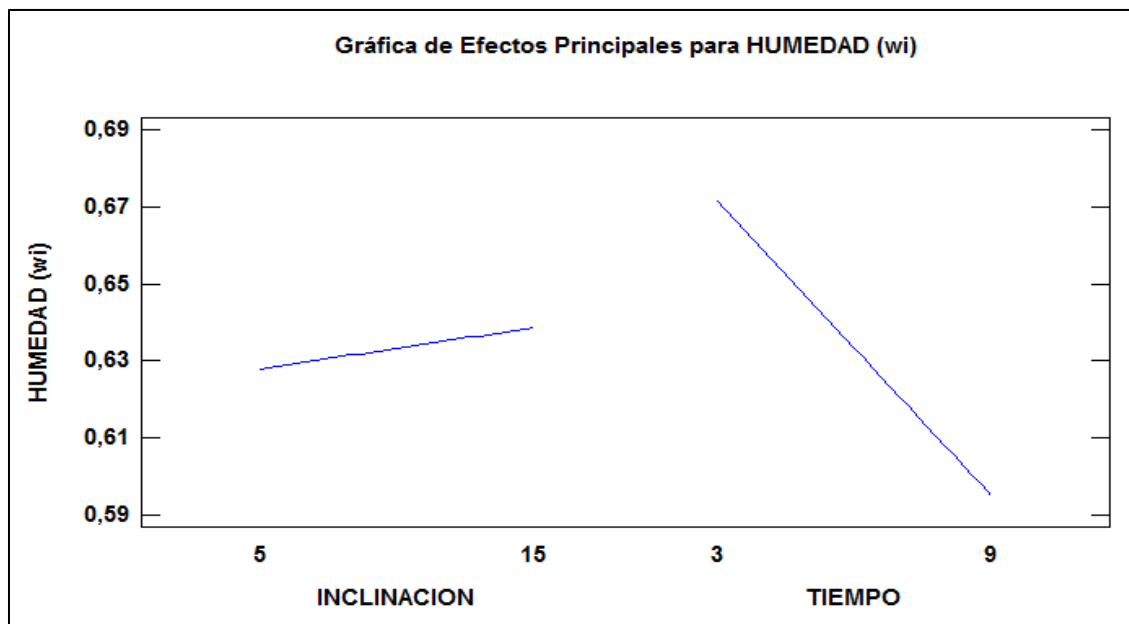


Fig.75: Grafico de efectos principales para humedad en relación de inclinación – tiempo.

Fuente: Autor

A continuación se presentan los resultados experimentales para la iteración zeolita-tiempo durante el proceso, para este experimento se ha usado una inclinación constante del 5%.

La (Fig. 76) muestra la matriz de variable respuesta para la iteración zeolita-tiempo con una réplica.

| BLOQUE | ZEOLITA | TIEMPO | HUMEDAD (wi) |
|--------|---------|--------|--------------|
|        | kg      | h      | kgw/kgs      |
| 1      | 12,0    | 3,0    | 0,9908       |
| 1      | 12,0    | 9,0    | 0,8033       |
| 1      | 0,0     | 3,0    | 1,0141       |
| 1      | 0,0     | 9,0    | 0,8633       |
| 2      | 12,0    | 3,0    | 0,9908       |
| 2      | 12,0    | 9,0    | 0,8033       |
| 2      | 0,0     | 3,0    | 1,0141       |
| 2      | 0,0     | 9,0    | 0,8633       |

Fig.76: Matriz de variable respuesta para la iteración zeolita- tiempo en un diseño factorial de 2k con una réplica, Fuente: Autor

La tabla 37 muestra el análisis de varianza para la humedad en la iteración zeolita-tiempo, con una inclinación constante de 5%.

Tabla 37: Análisis de varianza para humedad (wi) respecto de A: zeolita, B: Tiempo, e iteración AB.

Fuente: Autor

**Análisis de Varianza para HUMEDAD (wi)**

| Fuente        | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:ZEOLITA     | 0,00346944        | 1  | 0,00346944     |         |         |
| B:TIEMPO      | 0,0572234         | 1  | 0,0572234      |         |         |
| AB            | 0,000673445       | 1  | 0,000673445    |         |         |
| bloques       | 0,0               | 1  | 0,0            |         |         |
| Error total   | 0,0               | 3  | 0,0            |         |         |
| Total (corr.) | 0,0613663         | 7  |                |         |         |





R-cuadrada = 100,0 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 100,0 porciento

Error estándar del est. = 0,0

Error absoluto medio = 0,0

La tabla 37 particiona la variabilidad de HUMEDAD ( $w_i$ ) en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 0 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 100,0% de la variabilidad en HUMEDAD ( $w_i$ ). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 100,0%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0. El error medio absoluto (MAE) de 0,0 es el valor promedio de los residuos.

A continuación se muestra en la (Fig.77) el diagrama de Pareto para la iteración zeolita- tiempo incluida la iteración AB.

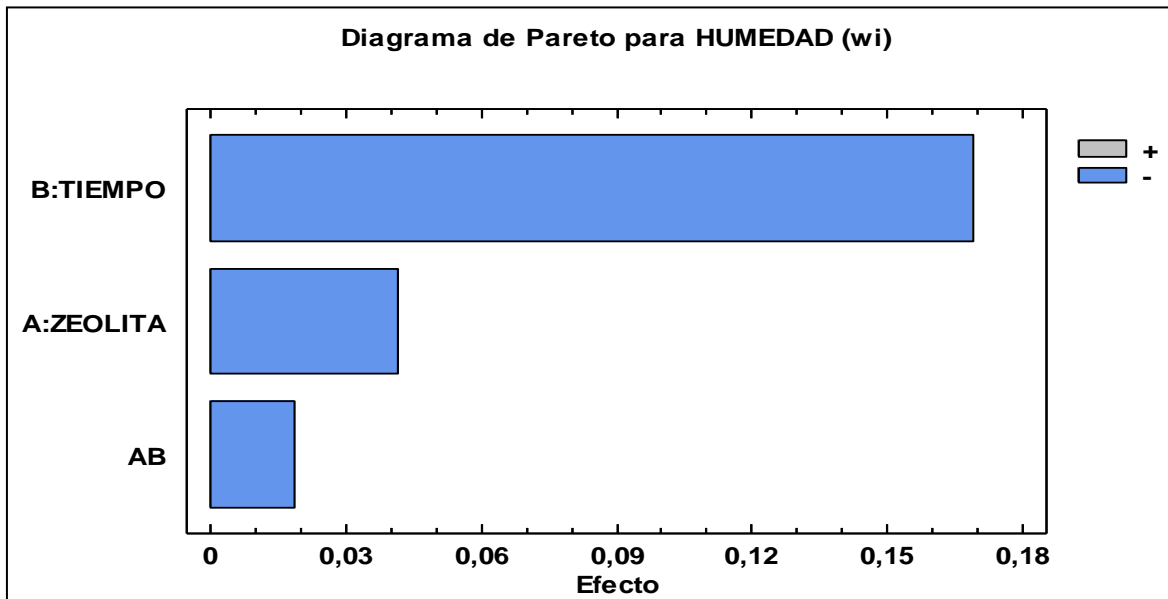


Fig.77: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración zeolita- tiempo.

Fuente: Autor

Tabla 38: Análisis de varianza para humedad (wi) respecto de A: Zeolita, B: Tiempo, excluida la iteración AB, Fuente: Autor

**Análisis de Varianza para HUMEDAD (wi)**

| Fuente        | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:ZEOLITA     | 0,00346944        | 1  | 0,00346944     | 20,61   | 0,0105  |
| B:TIEMPO      | 0,0572234         | 1  | 0,0572234      | 339,88  | 0,0001  |
| bloques       | 0,0               | 1  | 0,0            | 0,00    | 1,0000  |
| Error total   | 0,000673445       | 4  | 0,000168361    |         |         |
| Total (corr.) | 0,0613663         | 7  |                |         |         |

R-cuadrada = 98,9026 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98,0795 porciento

Error estándar del est. = 0,0129754

Error absoluto medio = 0,009175



Estadístico Durbin-Watson = 2,0 ( $P=0,4168$ )

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,125

La tabla 38 particiona la variabilidad de HUMEDAD ( $w_i$ ) en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98,9026% de la variabilidad en HUMEDAD ( $w_i$ ). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,0795%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0129754. El error medio absoluto (MAE) de 0,009175 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

La tabla 39 muestra los coeficientes de regresión obtenidos mediante statgraphics para el modelo matemático en la iteración zeolita- tiempo.

Tabla 39: Coeficientes de regresión para determinar la ecuación del modelo matemático.

Fuente: Autor

Coef. de regresión para HUMEDAD ( $w_i$ )

| Coeficiente | Estimado    |
|-------------|-------------|
| constante   | 1,10785     |
| A:ZEOLITA   | -0,00347083 |
| B:TIEMPO    | -0,0281917  |

La ecuación del modelo ajustado es

$$w_i = 1,10785 - 0,00347083Z - 0,0281917T \quad (4.6)$$

Donde:

$$w_i = \text{Humedad} \left( \frac{kgw}{kgs} \right)$$

$$Z = \text{Zeolita (kg)}$$

$$T = \text{Tiempo (h)}$$

Tabla 40: Trayectoria de máxima pendiente para humedad respecto de Zeolita y tiempo.

Fuente: Autor

Camino de Máximo Ascenso para HUMEDAD ( $w_i$ )

|                |               | <i>Predicción para</i>            |
|----------------|---------------|-----------------------------------|
| <i>ZEOLITA</i> | <i>TIEMPO</i> | <i>HUMEDAD (<math>w_i</math>)</i> |
| <i>(kg)</i>    | <i>(h)</i>    | <i>(kgw/kgs)</i>                  |
| 6,0            | 6,0           | 0,917875                          |
| 7,0            | 8,03061       | 0,857158                          |
| 8,0            | 10,0612       | 0,796441                          |
| 9,0            | 12,0918       | 0,735723                          |
| 10,0           | 14,1224       | 0,675006                          |
| 11,0           | 16,1531       | 0,614289                          |

La tabla 40 muestra el trayecto de máximo ascenso (o descenso). Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar o reducir HUMEDAD ( $w_i$ ). Actualmente, 6 puntos se han generado cambiando ZEOLITA en incrementos de 1,0 kg. Puede especificarse la cantidad de cambio en cualquiera de los factores presionando el botón secundario del ratón y seleccionando Opciones de Ventana. STATGRAPHICS determinará entonces cuanto tendrán que cambiar los otros factores para mantenerse en el trayecto del máximo ascenso. El programa también calcula la HUMEDAD ( $w_i$ ) estimada en cada

uno de los puntos del trayecto, con los cuales pueden compararse los resultados si es que se corren esos ensayos.

La (Fig. 78) muestra el diagrama de Pareto del efecto respuesta en la iteración zeolita- tiempo.

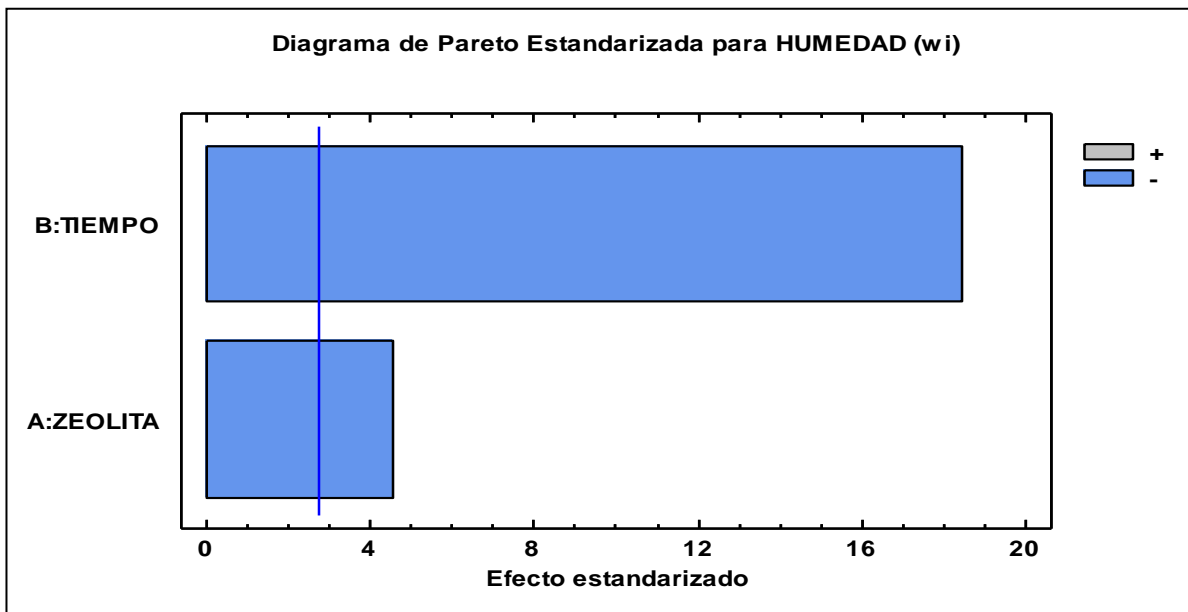


Fig.78: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración zeolita- tiempo, excluye iteración AB.

Fuente: Autor

A continuación se muestran los gráficos de superficie de repuesta y contornos de respuesta para el experimento en la iteración zeolita- tiempo con una inclinación constante de 5%.

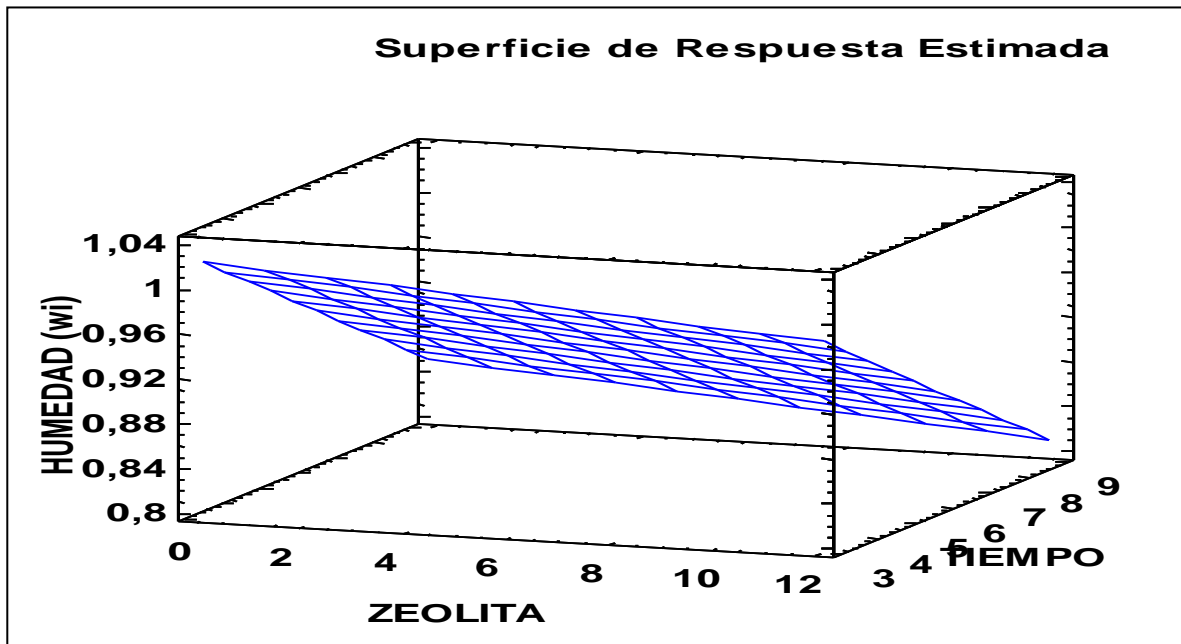


Fig.79: Grafico de superficie de respuesta estimada.

Fuente: Autor

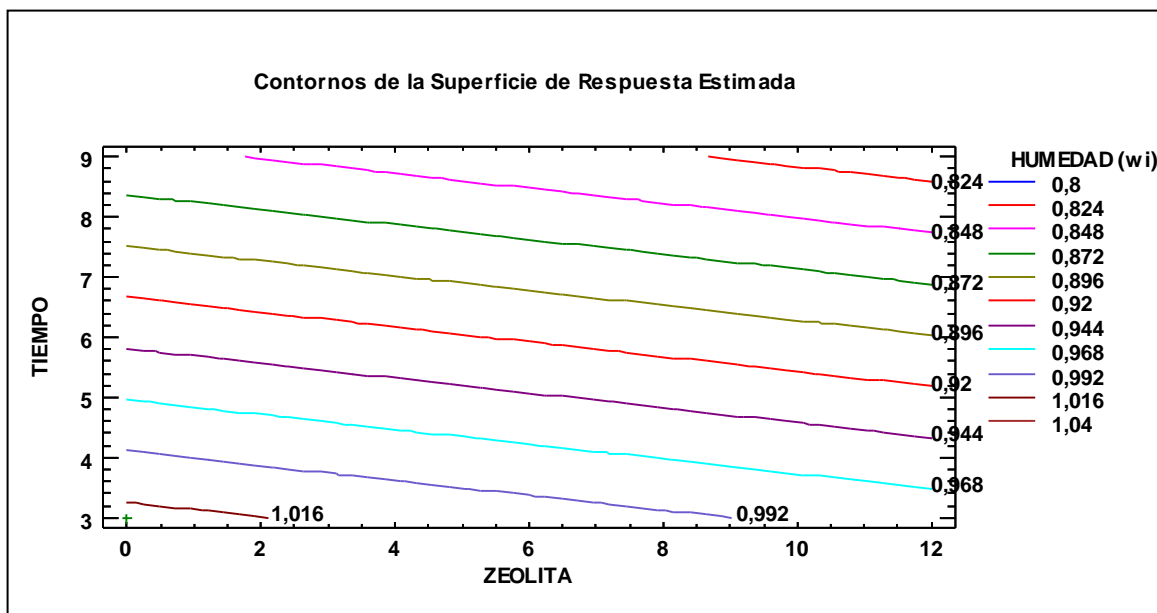


Fig.80: Grafico de contornos de superficie respuesta estimada.

Fuente: Autor

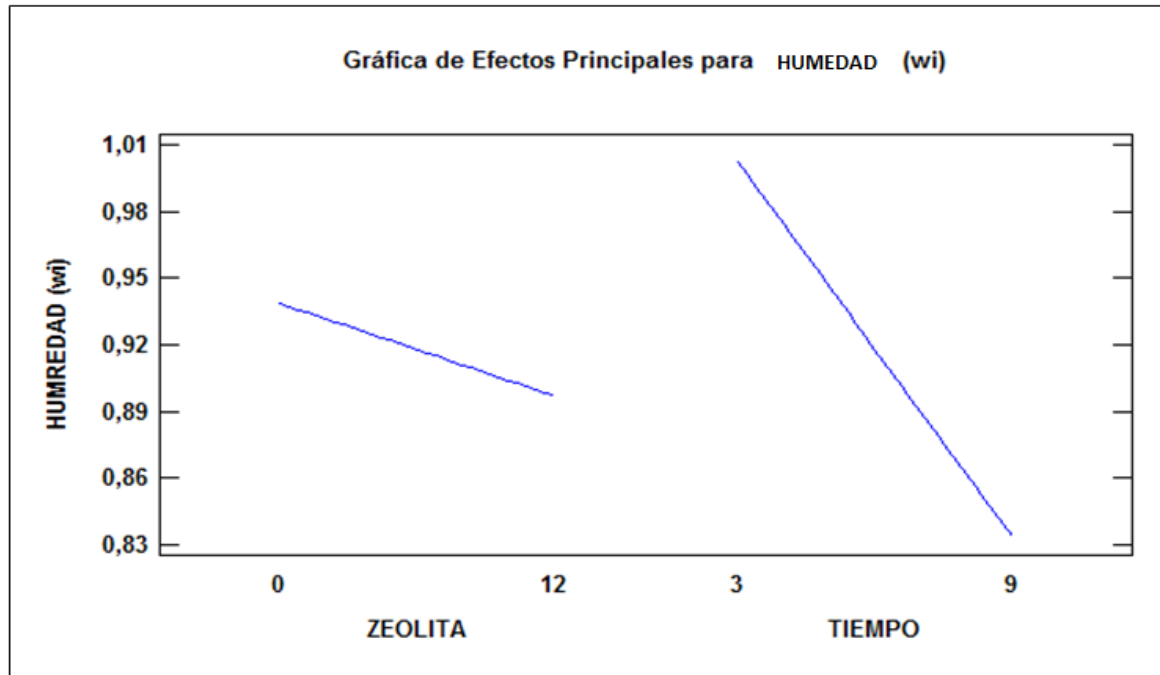


Fig.81: Grafico de efectos principales para humedad en relación a zeolita – tiempo.

Fuente: Autor

La (Fig.80) muestra los efectos en humedad producidos por cada variable dentro del experimento, en la iteración zeolita –tiempo, de donde se observa que las dos variables inciden en el proceso de secado, cada una en diferente grado

## 4.2.4 Análisis de los resultados experimentales

### Respecto al secado

En los experimentos realizados se observa que la aplicación del secador solar inclinado con absorbedor de zeolita resulta más eficiente que un secado al cielo abierto, esto debido a que presenta una mayor velocidad de secado, además los tiempos críticos disminuyen en 180 minutos en el caso del 5% de inclinación; y 150 minutos con el 15% de inclinación respecto al secado tradicional al sol (Ver tabla 23).

De igual modo se observa mayor velocidad de secado para el secador solar inclinado respecto al secado tradicional (Ver tablas 20, 21, 22)

Referente al tiempo total de secado se observa analíticamente que el secado con el 5% de inclinación y absorbedor de zeolita redujo el tiempo total de secado en 5 horas respecto al del 15% de inclinación y 49 horas aproximadamente respecto al secado solar en tendal, lo que justifica plenamente el uso de este tipo de secador para los productores de cacao, puesto que ahorrarán un 66,6% del tiempo que se lo destinaba secando el producto en un tendal. (Ver Fig. 65)

Analizando la experiencia de secado in situ en la cual no se utiliza fórmulas analíticas, se corrobora que el secado solar con un 5% de inclinación, resulta más eficiente que un secado solar en tendal, debido a que los tiempos de secado fueron de 29 y 65 horas respectivamente, presentando similar tendencia con los resultados analíticamente obtenidos. (Ver tablas 30, 31)

### Respecto a la inclinación del secador

Comparando los 2 escenarios propuestos en este estudio, es decir el secador solar con el 5% y 15% de inclinación, se observa que el primero presenta mejores resultados debido a que el tiempo crítico es menor en 30 minutos al segundo, y el





tiempo total calculado resulta 5 horas menor, cabe indicar que en estos experimentos se trabaja con la zeolita incluida en el secador, pero se analiza la inclinación del mismo.

### **Respecto al uso de zeolita.**

El resultado experimental con y sin presencia de zeolita en el proceso, demuestra que ésta tiene incidencia en el secado, comparando las dos experiencias realizadas, esto es utilizando 12 kg en el primer caso y 0 kg de zeolita en el segundo caso, el tiempo crítico de secado se reduce en 60 minutos a favor del experimento que usa zeolita. (Ver tabla 26)

Respecto a la variación de humedad relativa de tres ambientes distintos en el proceso de secado solar inclinado con absorbedor de zeolita (Fig.68) se tienen 3 isolneas que indican el ambiente exterior en % de humedad relativa, un ambiente en la superficie de secado de cacao, y un ambiente en la superficie de la zeolita.

El proceso empieza según lo indicado en la tabla 32, donde se observa que al principio el cacao presenta una humedad mayor respecto a la humedad de la zeolita; a partir de aquí la zeolita aumenta su humedad relativa a lo largo de la noche como también lo hace la humedad exterior y la del cacao, sin embargo existe una mayor hidratación de la zeolita respecto a la humedad del cacao a partir de las 22:30, en donde la humedad se incrementa un 2% aproximadamente en relación a la humedad del cacao, luego en la mañana por la influencia de la radiación solar la humedad exterior desciende, y con ella la zeolita como el cacao sufren deshidratación alcanzando un máximo alrededor de las 14:00, en donde la humedad empieza a subir según se incrementa la humedad exterior, este comportamiento se repite los días posteriores, de donde se establece el proceso cíclico de absorción y deshidratación de la zeolita dentro del proceso.



De modo similar la (Fig. 81) dentro del diseño experimental  $2^k$  evidencia que la zeolita incide en el proceso, debido a que el experimento que usa 12 kg de zeolita reduce más la humedad en comparación del que no la utiliza.

### **Respecto al diseño factorial $2^k$**

El resultado experimental  $2^k$  demuestra que existe incidencia tanto del grado de inclinación como del uso de zeolita durante el proceso de secado solar, esto se observa en los diagramas de Pareto en donde existe significancia de los 2 factores además del tiempo en el secado.

Excluyendo a factores que no inciden dentro del proceso, se obtienen los modelos matemáticos que con un nivel de confianza del 95%, explican el proceso en un 99,57% para el caso de la variación de la humedad respecto al porcentaje de inclinación, y en un 98,90% respecto al uso de la zeolita ( Ver tablas 34,38)

Así los modelos ajustados responden a dos ecuaciones matemáticas para cada caso de estudio (Ver ecuación 4.5, 4.6)

Finalmente existen gráficos de respuesta estimadas en donde se explica la variabilidad del proceso en condiciones intermedias tanto de inclinación del secador, como el uso de zeolita, luego de lo cual se confirma que la inclinación del 5% y el uso de la zeolita presentan mejores condiciones para el secado de cacao utilizando este tipo de secador propuesto. (Ver Fig. 73, 74, 79,80).

La tabla 41 muestra un resumen general de eficiencia en el secado solar inclinado con absorbedor de zeolita y el secado en tendal a cielo abierto, indicando parámetros como humedades críticas y tiempos de secado en los 3 escenarios propuestos en este estudio.



Tabla 41: Cuadro resumen de la eficiencia de secado solar inclinado y en tendal para el cacao CCN-51.

Fuente: Autor

| PROCESO  | Tiempo crítico de secado (h) | Humedad crítica de secado (kgw/kgs) | Tiempo para el período antecrítico (h) | Tiempo para el período poscrítico (h) | Tiempo total de secado de cacao (h) | Tiempo real de secado de cacao (h) |
|--|------------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Secado solar con 5% de inclinación y absorbedor de zeolita                                     | 1                            | 0,9429                              | 1,22                                   | 22,38                                 | 23,6                                | 29                                 |
| Secado solar con 15% de inclinación y absorbedor de zeolita                                    | 1,5                          | 0,8664                              | 1,89                                   | 26,34                                 | 28,23                               | *                                  |
| Secado solar en tendal   | 4                            | 0,6975                              | 4,9                                    | 67,81                                 | 72,71                               | 65                                 |
| * No realizado, debido a que se tomó el secado solar inclinado que presentó mejores resultados |                              |                                     |  |                                       |                                     |                                    |



Tomando los resultados de la tabla 41 para el cálculo del error relativo según la ecuación 4.7 se tiene:

$$er = \frac{fm - fr}{fr} \quad (4.7)$$

De donde:

$er$  = Error relativo

$fm$  = Valor medido

$fr$  = Valor real

Para el caso del 5% de inclinación  $er = -0,18$  o 18%

Para el caso de tendal  $er = 0,11$  o 11%

Para cálculos de ingeniería y debido a efectos que pueden incrementar el error, tales como características de los instrumentos de medición, que industrialmente pueden tener menos precisión, así como perturbaciones que pueden existir durante la medición, una desviación entre un 20 a 25% es satisfactoria ( Martínez, 1988).

Por este motivo, los valores medidos y calculados encajan dentro de este error relativo aplicado a procesos de ingeniería.

### **4.3 Guía para implementar un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita por convección natural para el grano de cacao CCN-51**

Para implementar este tipo de secador solar primero se debe estimar el rendimiento y área destinada a la construcción, en el capítulo 3.5.1 se indica el rendimiento del secador solar que se estima en  $25 \text{ kg/m}^2$ .

El tamaño del secador está en proporción al área de siembra de cacao, desafortunadamente la mayoría de áreas de siembra son dependientes de la capacidad económica de sus propietarios, por lo que el cálculo resulta relativo, es así que se ha estimado el tamaño por hectárea de siembra, la cual es:

Se toma un rendimiento promedio de  $510 \text{ kg/ha}^{27}$ , en periodo de mayores cosechas que van de septiembre a diciembre que por lo general representan 6 cosechas, entonces se divide los  $510 \text{ kg/ha}$  entre 6 cosechas, lo que da  $85 \text{ kg/ha}$ , esto significa que al menos se debe construir un secador de  $3,4 \text{ m}^2$  de área para una hectárea de siembra, con un costo aproximado de 311,20 dólares distribuidos así:

Tabla 42: Costo aproximado del secador solar inclinado para una hectárea de cultivo de cacao CCN-51.

Fuente: Autor

| Descripción              | Unidad       | Cantidad | P. Unitario | P. Total |
|--------------------------|--------------|----------|-------------|----------|
| Plancha de Policarbonato | $\text{m}^2$ | 3,4      | 40,00       | 136,00   |
| Zeolita                  | kg           | 20       | 0,2         | 4,00     |
| Soportes                 | $\text{m}^2$ | 6,8      | 9,00        | 61,20    |
| Estructura               | Global       | 1        | 60,00       | 60,00    |
| Mano de obra             | Unitario     | 1        | 50,00       | 50,00    |
|                          |              |          | Total USD   | 311,20   |

Por otro parte, al momento de secar los granos fermentados de cacao se deben ir moviéndolos cada cierto tiempo, para esto retiramos la cubierta de policarbonato y realizamos ésta operación. Algo importante al momento de su instalación es determinar las condiciones de dirección del viento, esto ayudará a ubicar el secador solar, más aún si éste se lo construye en bases fijas.

<sup>27</sup> Tomado del Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca MAGAP, 2001



La orientación del secador se la realiza según lo establecido por Sánchez (2011) orientándolo en dirección hacia el norte, puesto que nos encontramos en el hemisferio sur; además, si el mismo captador tiene una inclinación igual a la latitud del lugar, podrá permanecer mucho más tiempo en posición perpendicular a la radiación solar; aumentando la energía captada por el mismo.

Es conveniente secar el producto fermentado y no fresco, debido a que a más de no ser un proceso correcto, afectará a la zeolita por el desuerado y azúcares presentes.

## 4.4 Conclusiones del capítulo

En las experiencias de secado realizadas y analizados los resultados se concluye que el secador solar inclinado con absorbedor de zeolita presenta mejores aptitudes para el proceso de secado, sin duda las condiciones ambientales influyen en el secado como humedades relativas, radiación solar, que pueden afectar a la absorción de la zeolita, pero al final se observa que ésta contribuye al proceso de secado tanto en el modelo experimental, como en las pruebas de hidratación y absorción.

En relación a la inclinación se observa que a medida que incrementamos el porcentaje de inclinación, decrece la eficiencia del secador, este hecho se explica por la ubicación del Ecuador, en donde la radiación solar incide perpendicularmente sobre su superficie, lo que se asemeja a un panel fotovoltaico que se ubica en el Ecuador con poca inclinación para garantizar buena eficiencia debido a la latitud y ángulo de declinación solar.

En relación a la radiación solar, trabajando con índices promedio calculados en éste estudio en el lugar de experimentación, y según lo establecido por el CONELEC ver (Fig. 45) en donde el promedio anual del Ecuador es de  $4574,99 \text{ Wh/m}^2\text{día}$  resulta un recurso estratégico en el aprovechamiento energético del secado solar. Si bien su variabilidad se la puede medir mas no controlar, en este estudio todos los escenarios experimentales están bajo las mismas condiciones de radiación, por tanto en el análisis se han utilizado variables afectadas por ésta, como es temperatura, humedad relativa etc.



El proceso de secado se explica en el modelo matemático aplicado sobre Statghrapics, cuando se muestra la incidencia de la inclinación y presencia de zeolita en la disminución de la humedad del producto.

El tiempo es el principal factor influyente dentro del proceso de secado, sin embargo los factores introducidos como inclinación y zeolita tienen su grado de afectación sobre el secado.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los recursos naturales disponibles en el Ecuador han permitido determinar el gran potencial energético con que cuenta el País.

Este potencial energético permite determinar que todas las energías renovables son factibles de desarrollarse, unas en mayor medida, otras con más facilidad, algunas con mayores beneficios, pero todas son factibles de ser desarrolladas. A pesar de la factibilidad de desarrollarlas, el Ecuador presenta un retraso considerable, en energías renovables.

La principal causa de inexistencia de energías renovables en el Ecuador es la falta de conocimiento del recurso natural disponible. No se conoce el potencial energético de cada

uno de los recursos disponibles. Solamente se sabe que existe, pero no se conoce cuánto ni las características del mismo.

El Estado debería implementar políticas de desarrollo en energías renovables. Priorizando la instalación de modernas estaciones de medición que registren datos sobre precipitaciones, insolación, velocidad y dirección del viento a lo largo de todo el país. El potencial energético del país es enorme, actualmente incalculable e intangible.

En relación a la energía solar aplicada a procesos, este estudio tiene como finalidad dar una alternativa viable al secado solar artesanal y artificial, usando un secador solar inclinado a base de zeolita como material absorbente dentro del proceso. De este modo se busca mejorar económicamente y eficientemente el proceso por parte de los pequeños productores que no tienen recursos económicos para instalar secadores artificiales, por lo que se concluye que:

- El Ecuador como uno de los principales productores de cacao a nivel mundial, debe mejorar sus procesos dentro de la cadena de valor del producto en sus distintas etapas, actualmente pequeños y medianos productores de cacao no cuentan con asesoramiento técnico de ningún tipo, lo que ha provocado que su desarrollo socioeconómico se vea afectado pese a la demanda del producto, generando inequidad social.
- Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el Ecuador existen alrededor de 434.420 hectáreas de siembra de cacao de las cuales 7.105 hectáreas están en la provincia de Cañar generando 3100 toneladas métricas de producción.<sup>28</sup>

Tabla 43: Distribución del cultivo de cacao en el Ecuador.

Fuente: INEC, 2010

| Cultivos permanentes<br>solos más asociados | Menos de<br>1 | De 1 a<br>menos de 2 | De 2 a<br>menos de 3 | De 3 a<br>menos de 5 | De 5 a<br>menos de<br>10 | De 10 a<br>menos de<br>20 | De 20 a<br>menos de<br>50 | De 50 a<br>menos de<br>100 | De 100 a<br>menos de<br>200 | Más de<br>200 | Total  |
|---|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|--------|
| Hectáreas                                   | 1771          | 6070                 | 10298                | 23018                | 64006                    | 84952                     | 128764                    | 63292                      | 26270                       | 25979         | 434420 |
| Porcentaje                                  | 0.4%          | 1.4%                 | 2.4%                 | 5.3%                 | 14.7%                    | 19.6%                     | 29.6%                     | 14.6%                      | 6.0%                        | 6.0%          | 100%   |

<sup>28</sup> Tomado de Instituto ecuatoriano de Estadística y Censos ESPAC 2010





- Por lo que la provincia del Cañar representa el 1,63% de la producción de cacao del Ecuador, por otra parte según la tabla 43 existe un 4,2% de cultivos menores a 3 hectáreas en donde se encuentran los pequeños productores de cacao, para quienes este proyecto está enfocado.

### **En relación al secado:**

- La inclinación del secador solar influye en el proceso, sin embargo según la experiencia realizada una inclinación del 15% resulta operativamente ineficiente debido a que durante el proceso de secado el grano pierde humedad y se vuelve resbaladizo, esto provoca una acumulación indeseable en la parte inferior del secador. Es por esto que una inclinación del 5% resulta ser más eficaz para este tipo de secador solar.
- En una primera experiencia de secado realizada en la ciudad de Cuenca bajo las mismas circunstancias operativas, se obtuvieron resultados similares que inducían a estimar que el secado con una inclinación del 5% resultaba más eficiente que el secado con un 15% de inclinación así como un secado en tendal, ver anexo 4.
- La estimación presentada en la tabla 7 resulta importante al momento de trabajar con el secador solar debido a que presenta un rango de 0 a 5% de inclinación en el cual se obtiene máximo rendimiento del secador solar para cada época del año, debiéndose tener en cuenta que desde el 22 de septiembre al 22 de marzo la orientación es norte, y del 22 de marzo al 22 de septiembre la orientación es sur.
- El empleo del secador solar inclinado resulta ser una alternativa viable para pequeños productores de cacao, además de ser más cómodo frente al secado artesanal al sol, por el hecho de estar protegido por su cubierta de policarbonato, la cual actúa como protección contra lluvias y provoca efecto invernadero. La tabla 44 muestra una estimación financiera que confirma la viabilidad de implementar este tipo de secador para los productores de cacao.

Tabla 44: Estimación financiera de la viabilidad del proyecto.

Fuente: Autor

| INGRESOS                    |                | EGRESOS                     |               |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|---------------|
| Meses                       | 12             | Costo del secador           | 311,2         |
| Ingreso mensual dólares     | 94,4           | Gasto en cosechas           | 240           |
| Ingreso anual dólares       | 1133,3         | Insumos químicos por ha/año | 80            |
| Precio referencial/ quintal | 100,00         | Mantenimiento por ha/año    | 142           |
| <b>TOTAL</b>                | <b>1133,30</b> |                             | <b>773,20</b> |

| PERIODO MENSUAL |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                 | 0      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| <b>INGRESOS</b> | 94,4   | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 | 94,4 |
| <b>EGRESOS</b>  | 349,7  | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 | 38,5 |
| <b>TOTAL</b>    | -255,3 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 | 55,9 |

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| <b>TIR</b>              | 19,25% |
| <b>VAN</b>              | 365,64 |
| <b>TOP<sup>29</sup></b> | 1,21%  |

- La tabla 44 muestra un estimado de la viabilidad del proyecto para un período de 12 meses con una inversión inicial de 349,7 dólares y tomando como base referencial el precio del cacao seco en 100 dólares<sup>30</sup> se tienen indicadores rentables financieramente.
- La tasa interna de retorno (TIR) resulta mayor a la tasa de oportunidad estimada en un 1,21% mensual, y el valor presente neto (VAN) resulta mayor a cero lo que indica la viabilidad financiera del proyecto.
- La zeolita según resultados obtenidos tiene incidencia en el proceso de secado, además su utilización resulta viable debido a su bajo costo.
- La reducción de los tiempos de secado se nota claramente con el empleo del secador solar frente al secado artesanal al sol, esto indica que al disminuir los tiempos de secado estamos frente a un proceso más eficiente utilizando los mismos recursos ambientales.

<sup>29</sup> Banco Central del Ecuador. [www.bce.fin.ec/10/04/2013](http://www.bce.fin.ec/10/04/2013)

<sup>30</sup> Anecacao, [www.anecacao.com/10/04/2013](http://www.anecacao.com/10/04/2013)



### **Recomendaciones:**

- Utilizar el secador solar con una inclinación de no más del 5%, debido a su operatividad y eficiencia conseguidas.
- Se recomienda en el diseño del secador solar tener mayor superficie de contacto entre el cacao y la zeolita, es decir tener mayor número de agujeros por área de contacto, para de este modo conseguir una mejor absorción de humedad por parte de la zeolita.
- Se recomienda que para la construcción del secador solar no se utilice necesariamente estructura metálica para soportes, debido a que las condiciones ambientales pueden variar de un lugar a otro y esto podría ocasionar daños como oxidación si la zona es lluviosa, además se puede abaratar costos si se usa madera.
- El uso de este secador no es propio únicamente del cacao, sino que se puede utilizar para secar otro tipo de productos como granos y cereales, lógicamente el rendimiento tendrá su variación dependiendo de las propiedades del producto a ser secado.
- En el diseño del secador se recomienda que el espacio para la circulación de aire no sea superior a 5cm, esto favorecerá al efecto invernadero que ocurre dentro del secador.
- Se recomienda utilizar dependiendo del material a secar, su correspondiente isoterma de adsorción además de un higrómetro, para conocer la humedad relativa del ambiente y de equilibrio del producto, esto dará un indicio de cuanto se puede secar el material en las condiciones in situ.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Boizán Jústiz, M; SECADO FLUIDIZADO DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS; Santiago de Cuba, Editorial Oriente, 1986.
- [2] Strumillo, C., Kudra, T; DRYING PRINCIPLES APPLICATIONS AND DESIGN; Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland, 1986.
- [3] Bergues, C. *et al*; ESTUDIO DE LA CINÉTICA DEL SECADO DE GRANOS EN EL PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS; Revista Tecnología Química, 1993.
- [4] Nielsen S. *et al*; FOOD ANALYSIS LABORATORY MANUAL; Kluwer Academic/Plenum Publishers, Nueva York, 2003.
- [5] Dubinin M. *et al*; DESCRIPTION OF ADSORPTION EQUILIBRIA OF VAPORS ON ZEOLITES OVER WIDE RANGES OF TEMPERATURE AND PRESSURE: IN MOLECULAR SIEVE ZEOLITES-II; American Chemical Society, Washington, D.C, 1971.
- [6] Dávila Nava J. R; ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA POROSIDAD DE PARTÍCULAS SOBRE EL PROCESO DE SECADO EN UN LECHO FLUIDIZADO A VACÍO EMPLEANDO AIRE; Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, 2004.
- [7] Larios Saldaña, L. *et al*; DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHIDRATADOR INDIRECTO DE CACAO MEDIANTE EL USO DE AIRE CALENTADO POR ENERGÍA SOLAR, CARACAS, 2004.



- [8] Bell, CH. *et al*; REPORT FOR LINK PROJECT AFM87 – MODIFIED ATMOSPHERES AT RAISED TEMPERATURE, AN ALTERNATIVE TO METHYL BROMIDE AS A MEANS OF ENSURING CLEAN, PEST-FREE, HYGIENIC STANDARDS IN FOOD COMMODITIES, 2003.
- [9] Mark E Mcbratney; NATURAL ZEOLITE IN A CONTUNOUS PARTICULATE MEDIUM CORN DRYER, 1989.
- [10] Barbosa, G. *et al*; DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS; Zaragoza: Acribia, 2000.
- [11] Delgado, E. *et al*; SECADORES SOLARES - TÉRMICOS PARA GRANOS Y FRUTAS PARA UTILIZARLO EN ZONAS REMOTAS, 2009.
- [12] Soria, E. *et al*; DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO CON COLECTORES SOLARES PLANOS MEDIANTE CONVECCIÓN FORZADA PARA UNA CAPACIDAD DE 500 kg, 2006.
- [13] Solis, P; DESARROLLO DE UNA ALTERNATIVA PARA LA PRESERVACIÓN DEL BRÓCOLI DE EXPORTACIÓN DISMINUYENDO CONSUMO DE ENERGÍA Y COSTOS DE PRODUCCIÓN PROVEFRUT S.A. COTOPAXI, 2012.
- [14] Walpole, R. *et al*; PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA, 2009.
- [15] Gaetano, P. *et al*; MANUALES DE EDUCACIÓN AGROPECUARIA. ELABORACIÓN DE PRODUCTOS AGRÍCOLA; Trillas México, 1985.
- [16] Bergues, C *et al*; GENERALIZACIÓN DE SECADORES SOLARES DIRECTOS EN CUBA. ANÁLISIS NUMÉRICO DE SUS TENDENCIAS ACTUALES, 2010.



- [17] Bergues, C et al; CONSTRUCCION Y EVALUACION DEL SECADOR SOLAR DE GRANOS A ESCALA INDUSTRIAL DE 3M3 EN CONDICIONES DE EXPLOTACION, Revista tecnología química, 2002.
- [18] Berriz, L; APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR; Energía y tú, 2006.
- [19] Ocon-Tojo; PROBLEMAS DE INGENIERÍA QUÍMICA; Tomo II, 1970.
- [20] Bombino, E et al; EFECTO DE LA ESPIRAL NORMAL EN EL MOVIMIENTO VORTIGINOSO CON PARTICULAS DE BAGAZO DE CAÑA; Universidad de Oriente, Santiago de Cuba; 2012
- [21] Desrosier, N. et al; CONSERVACION DE ALIMENTOS; Editorial continental; México, 1991.
- [22] Páez, S; DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE ALMIDON DE YUCA; Escuela Politécnica Nacional; Quito, 1990.
- [23] FAO; SECADO DE GRANOS Y SECADORAS; Santiago de Chile, 1996.
- [24] Rosero, J; LA VENTAJA COMPARATIVA DEL CACAO ECUATORIANO; Apuntes de economía N° 20; Guayaquil, 2002.
- [25] MAGAP; DIAGNOSTICO DE LA CADENA DE VALOR DEL CACAO EN EL ECUADOR; 2010.
- [26] Guachamín, C; DISEÑO DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO FINO; Escuela Politécnica Nacional; Quito, 2008.
- [27] Espinoza, J. et al; GIS-BASED SITE-SPECIFIC MANAGEMENT OF COCOA; Quito, 2006.
- [28] Lemus, M. et al; EFECTO DEL MEZCLADO DE CACAOS CRIOLLO Y FORASTERO DE LA LOCALIDAD DE CUMBOTO SOBRE ALGUNAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS GRANOS DURANTE LA FERMENTACION; Venezuela, 2001.



[29] FAO; CALIDAD DE LOS ALIMENTOS VINCULADOS CON EL ORIGEN Y LAS TRADICIONES EN AMERICA LATINA; Guayaquil, 2010.

[30] Hernández, A; GEOSOL UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CALCULO DE COORDENADAS SOLARES Y LA ESTIMACION DE IRRADIACION SOLAR HORARIA; Instituto de Investigaciones de energía no convencional; Argentina, 2003.

[31] Pinto, C. *et al*; REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DEL CACAOTERO DURANTE UN CICLO ANUAL; Instituto internacional de Ciencia Agrícolas, 1981.

[32] Uribe, A. *et al*; EFECTO DE NIVELES DE NITROGENO, FOSFORO Y POTASIO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE CACAO EN LOS SUELOS DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER; 2010.

[33] Shyam, S; ENERGIA SOLAR- CONCEPTOS BASICOS Y SU UTILIZACION; Costa Rica, 2005.

[34] Incropera, F. *et al*; FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR; cuarta edición; México, 1999

#### PAGINAS WEB

[21] [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)

[22] [www.igm.gob.ec](http://www.igm.gob.ec)

[23] [www.conelec.gob.ec](http://www.conelec.gob.ec)

[24] [www.ing.unrc.edu.ar/materias/energia.../teorico\\_conduccion.pdf](http://www.ing.unrc.edu.ar/materias/energia.../teorico_conduccion.pdf)

[25] [www.inamhi.gob.ec](http://www.inamhi.gob.ec)

[26] [www.meteored.com.ec](http://www.meteored.com.ec)



## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1: Curva de secado.....  | 13 |
| Fig.2: Curva de velocidad de secado.....  | 14 |
| Fig.3: Principales países consumidores.....   | 22 |
| Fig.4: Producción mundial de cacao en grano, molienda y balance oferta-demanda..... | 22 |
| Fig.5: Distribución de la demanda de cacao Ecuatoriano.....                         | 23 |
| Fig.6: Distribución de la producción de cacao en el Ecuador.....                    | 24 |
| Fig.7: Variedad de cacao criollo.....   | 27 |
| Fig.8: Variedad de cacao forastero.....   | 27 |
| Fig.9: Variedad de cacao trinitario.....  | 28 |
| Fig.10: Variedad de cacao CCN51.....  | 28 |
| Fig.11: Cosecha y quiebra de cacao.....   | 33 |
| Fig.12: Granos fermentados.....   | 35 |
| Fig.13: Secado en tendales.....   | 36 |
| Fig.14: Secado artificial de cacao.....   | 38 |





|  |    |
|--|----|
| Fig.15: Secado artificial de cacao, combustible diésel.....                            | 39 |
| Fig.16: Tendal económico.....  | 40 |
| Fig.17: Tendal rodante.....  | 41 |
| Fig.18: Secador solar directo.....   | 42 |
| Fig.19: Estructura básica de una zeolita.....  | 43 |
| Fig.20: Mineral de analcima.....   | 45 |
| Fig.21: Mineral de chabazita.....  | 45 |
| Fig.22: Mineral de natrolita.....  | 46 |
| Fig.23: Secador solar con cubierta de plástico.....                                    | 47 |
| Fig.24: Secador solar indirecto.....   | 48 |
| Fig.25: Secador solar indirecto.....   | 54 |
| Fig.26: Isotherma de sorción de cacao.....   | 57 |
| Fig.27: Detalle del secador solar inclinado con zeolita.....                           | 58 |
| Fig.28: Secador solar inclinado.....   | 59 |
| Fig.29: Placa de policarbonato.....  | 60 |
| Fig.30: Placa de madera.....   | 61 |
| Fig.31: Detalle de perforación para la placa de madera.....                            | 62 |
| Fig.32: Estructura del secador solar inclinado.....                                    | 62 |
| Fig.33: Mapa del área de influencia de cultivos de cacao en el cantón La Troncal.....  | 65 |
| Fig.34: Precipitación mensual para el cantón Naranjal .....                            | 67 |
| Fig.35: Temperatura promedio mensual para el cantón Naranjal.....                      | 67 |
| Fig.36: Temperatura promedio Noviembre 2012 para en cantón La Troncal.....             | 68 |
| Fig.37: Presión atmosférica promedio Noviembre 2012 para en cantón La Troncal.....     | 68 |
| Fig.38: Precipitación-Nubosidad promedio Noviembre 2012 para en cantón La Troncal..... | 68 |
| Fig.39: Velocidad del viento promedio Noviembre 2012 para en cantón La Troncal.....    | 69 |
| Fig.40: Humedad relativa promedio Noviembre 2012 para en cantón La Troncal.....        | 69 |
| Fig.41: Promedio de radiación difusa en el Ecuador.....                                | 70 |
| Fig.42: Histograma de frecuencias.....   | 70 |
| Fig.43: Promedio de radiación directa en el Ecuador.....                               | 71 |



|  |     |
|--|-----|
| Fig.44: Histograma de frecuencias.....   | 71  |
| Fig.45: Promedio de radiación global en el Ecuador.....  | 72  |
| Fig.46: Histograma de frecuencias.....   | 72  |
| Fig.47: Gráfico de la declinación solar e inclinación para el secador solar.....   | 74  |
| Fig.48: Balanza analítica usada.....   | 75  |
| Fig.49: Balanza electrónica usada.....   | 75  |
| Fig.50: GPS Garmin usado.....  | 76  |
| Fig.51: Anemómetro usado.....  | 76  |
| Fig.52: Higrómetro usado.....  | 77  |
| Fig.53: Termómetro usado.....  | 77  |
| Fig.54: Curva de secado de cacao.....  | 84  |
| Fig.55: Aproximaciones lineales para la determinación del tiempo crítico en el secado de cacao.....                            | 85  |
| Fig.56: Curva de velocidad de secado.....  | 86  |
| Fig.57: Ambientes dentro del secador solar inclinado.....  | 88  |
| Fig.58: Región experimental.....   | 92  |
| Fig.59: Gráfico de la curva de secado con el 5% de inclinación.....  | 96  |
| Fig.60: Gráfico de la curva de secado con el 15% de inclinación.....   | 97  |
| Fig.61: Gráfico de la curva de secado en tendal a cielo abierto.....   | 97  |
| Fig.62: Gráfico de la curvas de secado con el 5%,15% y tendal a cielo abierto.....   | 98  |
| Fig.63: Gráfico de la curva de secado con 12kg de zeolita y el 5% de inclinación.....  | 101 |
| Fig.64: Gráfico de la curva de secado sin zeolita y el 5% de inclinación.....  | 101 |
| Fig.65: Tiempo total de secado para cada escenario .....   | 104 |
| Fig.66: Curva de secado real para una inclinación del 5%.....  | 108 |
| Fig.67: Curva de secado real para el secado solar en tendal.....   | 108 |
| Fig.68: Gráfico de ambientes influyentes en el secador solar .....   | 110 |
| Fig.69: Gráfico comparativo entre ambientes influyentes en el secador solar y descenso de humedad porcentual del producto..... | 111 |
| Fig.70: Matriz de variable respuesta para la iteración inclinación-tiempo en un diseño factorial 2k con una réplica.....       | 112 |



|  |     |
|--|-----|
| Fig.71: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración inclinación-tiempo.....                               | 114 |
| Fig.72: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración inclinación-tiempo excluye iteración AB.....          | 117 |
| Fig.73: Gráfico de superficie respuesta estimada.....  | 117 |
| Fig.74: Gráfico de contornos de superficie respuesta.....  | 118 |
| Fig.75: Gráfico de efectos principales para humedad en relación de inclinación – tiempo.....                           | 118 |
| Fig.76: Matriz de variable respuesta para la iteración zeolita - tiempo en un diseño factorial 2k con una réplica..... | 119 |
| Fig.77: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración zeolita-tiempo.....                                   | 120 |
| Fig.78: Diagrama de Pareto para efecto respuesta en la iteración zeolita-tiempo excluye iteración AB.....              | 123 |
| Fig.79: Gráfico de superficie respuesta estimada.....  | 124 |
| Fig.80: Gráfico de contornos de superficie respuesta.....  | 124 |
| Fig.81: Gráfico de efectos principales para humedad en relación de zeolita – tiempo.....                               | 125 |
| Fig.82: Curva de secado con el 5% de inclinación realizada en Cuenca.....  | 152 |
| Fig.83: Curva de secado con el 15% de inclinación realizada en Cuenca.....   | 152 |
| Fig.84: Curva de secado en tendal realizada en Cuenca.....   | 153 |
| Fig.85: Zeolita colocada en la base del secador solar.....   | 155 |
| Fig.86: Proceso preliminar de secado realizado en la ciudad de Cuenca .....  | 156 |
| Fig.87: Recolección del cacao durante el proceso de secado.....  | 156 |
| Fig.88: Proceso de secado realizado en el canton La Troncal, provincia de Cañar.....                                   | 157 |
| Fig.89: Cacao CCN-51 durante el proceso de secado.....   | 157 |
| Fig.90: Secado solar inclinado.....  | 157 |
| Fig.91: Controles de humedad relativa dentro del secador solar inclinado.....  | 158 |



## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Ventajas y desventajas de distintos tipos de secadores.....           | 9  |
| Tabla 2: Requisitos para la calidad del cacao.....                             | 25 |
| Tabla 3: Efecto de niveles crecientes de N y K en el rendimiento de cacao..... | 32 |
| Tabla 4: Valores de circulación térmica.....                                   | 52 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 5: Constantes de equilibrio, ecuaciones de humedad relativa.....                               | 56  |
| Tabla 6: Variables meteorológicas sector Naranjal.....   | 66  |
| Tabla 7: Inclinação para el secador en relación a la declinación solar y latitud.....                | 73  |
| Tabla 8: Ficha técnica de la zeolita que se usa en el experimento.....                               | 80  |
| Tabla 9: Datos meteorológicos de la zona de estudio.....   | 81  |
| Tabla 10: Escenarios posibles para determinar la eficiencia en la inclinación del secador solar..... | 82  |
| Tabla 11: Datos para construir la curva de secado .....  | 83  |
| Tabla 12: Intervalos, aproximaciones, humedad y tiempo crítico.....                                  | 85  |
| Tabla 13: Estimación del tiempo total de secado.....   | 87  |
| Tabla 14: Factores y sus niveles.....  | 91  |
| Tabla 15: Matriz de variable respuesta.....  | 92  |
| Tabla 16: Factores y niveles respecto al porcentaje de inclinación del secador solar.....            | 93  |
| Tabla 17: Factores y niveles respecto a la cantidad de zeolita en el secador solar.....              | 94  |
| Tabla 18: Matriz de variable respuesta tomando el porcentaje de inclinación del secador solar.....   | 94  |
| Tabla 19: Matriz de variable respuesta tomando la cantidad de zeolita en el secador solar.....       | 94  |
| Tabla 20: Datos registrados para el secado solar de cacao con el 5% de inclinación.....              | 95  |
| Tabla 21: Datos registrados para el secado solar de cacao con el 15% de inclinación.....             | 95  |
| Tabla 22: Datos registrados para el secado solar de cacao en tendal a cielo abierto.....             | 96  |
| Tabla 23: Intervalos, aproximaciones de humedades y tiempos críticos de secado.....                  | 99  |
| Tabla 24: Datos registrados para el secado solar de cacao con zeolita.....                           | 100 |
| Tabla 25: Datos registrados para el secado solar de cacao sin zeolita.....                           | 100 |
| Tabla 26: Intervalos, aproximaciones de humedades y tiempos críticos de secado.....                  | 102 |
| Tabla 27: Estimación del tiempo total de secado para un 5 % de inclinación.....                      | 103 |
| Tabla 28: Estimación del tiempo total de secado para un 15 % de inclinación.....                     | 103 |
| Tabla 29: Estimación del tiempo total de secado en tendal.....                                       | 104 |
| Tabla 30: Datos registrados para el secado solar en la experiencia real con el 5% de inclinación...  | 105 |
| Tabla 31: Datos registrados para el secado solar en la experiencia real en tendal.....               | 106 |



|   |     |
|---|-----|
| Tabla 32: Humedades relativas influyentes en el secador solar.....  | 109 |
| Tabla 33: Análisis de varianza para humedad respecto a inclinación, tiempo e iteración AB.....            | 113 |
| Tabla 34: Análisis de varianza para humedad respecto a inclinación, tiempo excluida la iteración AB.....  | 114 |
| Tabla 35: Coeficiente de regresión para determinar la ecuación del modelo matemático.....                 | 115 |
| Tabla 36: Trayectoria de máxima pendiente para humedad respecto a inclinación- tiempo.....                | 116 |
| Tabla 37: Análisis de varianza para humedad respecto a zeolita, tiempo e iteración AB.....                | 119 |
| Tabla 38: Análisis de varianza para humedad respecto a zeolita, tiempo excluida la iteración AB..         | 121 |
| Tabla 39: Coeficiente de regresión para determinar la ecuación del modelo matemático.....                 | 122 |
| Tabla 40: Trayectoria de máxima pendiente para humedad respecto a zeolita, tiempo.....                    | 122 |
| Tabla 41: Cuadro resumen de la eficiencia de secado solar inclinado y en tendal para el cacao ccn-51..... | 129 |
| Tabla 42: Costo aproximado del secador solar inclinado para una hectárea de cultivo.....                  | 131 |
| Tabla 43: Distribución del cultivo de cacao en el Ecuador.....  | 134 |
| Tabla 43: Estimación financiera de la viabilidad del proyecto.....  | 135 |

## Significados y símbolos



$T_g$ : Temperatura del aire húmedo

$U_g$ : Velocidad superficial del aire

$Y$ : Humedad del aire

$m_A$ : Masa de material húmedo

$m_S$ : Masa del sólido

$N$ : Diferencial de humedad respecto al tiempo de secado

$W_D$ : Velocidad de secado teórica de secado del material

$T_s$ : Temperatura de la superficie

$W_{Dcr}$ : Velocidad crítica de secado (teórica)

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección

$K_g$ : Coeficiente de transmisión de masa para velocidad de gas constante

$t$ : Tiempo de secado

$X_{cr}$ : Contenido crítico de humedad (teórico)

$\rho_c$ : Densidad del cacao

$C_p$ : Calor específico del cacao

$q$ : Trasmisión de calor por convección

$K$ : Coeficiente de conducción térmica

$\alpha$ : Difusividad térmica

$A_c$ : Área del secador

$Z_c$ : Altura de la cama de secado

$m_w$ : Masa de agua en la muestra

$m$ : Pérdida de peso de la muestra

$w_i$ : Humedad en la muestra experimental

$V$ : Velocidad experimental de secado

$w_c$ : Humedad crítica de secado en el experimento



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

$t_c$ : Tiempo crítico de secado en el experimento

$I$ : Inclinação del secador

$Z$ : Cantidad de zeolita

$\delta$ : Declinación solar





## Anexos:

### Anexo 1: Características del GPS Garmin 550<sup>31</sup>

| Características Físicas y Rendimiento:   |  |
|--|--|
| Dimensiones de la unidad (Ancho/Alto/Profundidad):   | 2.3 "x 4.5" x 1.4 "(5,8 x 11,4 x 3,5 cm)                           |
| Tipo de pantalla:  | color transreflectiva TFT de pantalla táctil                       |
| Resistente al agua:  | Sí (IPX7)  |
| Receptor de alta sensibilidad:   | Si   |
| Interfaz de equipo:  | USB de alta velocidad y compatible con NMEA 0183                   |
| Flotante:  | Si   |
| Cartografía y Memoria:   |  |
| Mapa base:   | Si ( ChileTopo Tarjeta SD)   |
| Posibilidad de agregar mapas:  | Si   |
| Waypoints:   | 2000   |
| Rutas:   | 200  |
| Tracks Log:  | 10.000 puntos, 10 tracks guardados                                 |
| Prestaciones:  |  |
| Creación automática de rutas (giro a giro en carretera):                                   | sí (con la cartografía opcional para carreteras detallada)         |
| Brújula electrónica:   | sí (con inclinación compensada, 3 ejes)                            |
| Pantalla táctil:   | Si   |
| Altímetro barométrico:   | Si   |
| Camera:  | sí (con 3,2 megapíxeles de enfoque automático, zoom digital de 4x) |
| Modo geocaching:   | Si   |
| Juegos GPS para exteriores:  | Sí (Wherigo solamente)   |
| Calendario de caza y pesca:  | Si   |
| Información astronómica:   | Sí   |
| Predicción de mareas:  | Si   |
| Cálculo de áreas:  | Si   |
| Puntos de interés personalizables (posibilidad de agregar puntos de interés adicionales) : | Si   |
| Foto de navegación (navegación por imágenes georeferenciadas):                             | Si   |

<sup>31</sup> Tomado de “ Manual del usuario [www.garmin.com](http://www.garmin.com) 17/12/2012



## Anexo 2: Especificaciones del anemómetro DKI TYP.<sup>32</sup>

**Rango de medida** 60-1200 m/min

**Precisión** 300 m/min 1%

1200 m/min 5,5%

**Ancho** 80 mm

**Largo** 60 mm

**Alto** 145 mm

**Peso** 0,15 kg

---

<sup>32</sup> Tomado de manual del usuario KANALAS SZÉLSEBESSÉGMÉRŐ / ANEMOMÉTER/



## Anexo 3: Especificaciones del Termohigrómetro Radioshack A210<sup>33</sup>

Rango de temperatura interior: 32-122 ° F

Rango de temperatura exterior: -58 a 158 ° F

Humedad relativa del 25% RH a 95% RH sonda externa

### Especificaciones técnicas Características Generales

modelo A210

Tipo de Producto Interior / exterior

Varios Características

Idiomas admitidos Inglés

Características de la fuente

Dispositivo de alimentación pilas "AAA" (1)

Características de la Batería

Tipo de producto Batería

Química Alcalina

Tamaño AAA

Características del Termómetro

temperatura Sí

Humedad Sí

Rangos de temperatura interior 32-122 ° F exterior -58-158 ° F

---

<sup>33</sup> Tomado de [www.radioshack.com/](http://www.radioshack.com/) 17/12/2012

Tendencia-Humedad Sí

Tendencia de Temperatura Sí

## Anexo 4: Experiencia preliminar de secado realizado en Cuenca el 9 de Noviembre de 2012

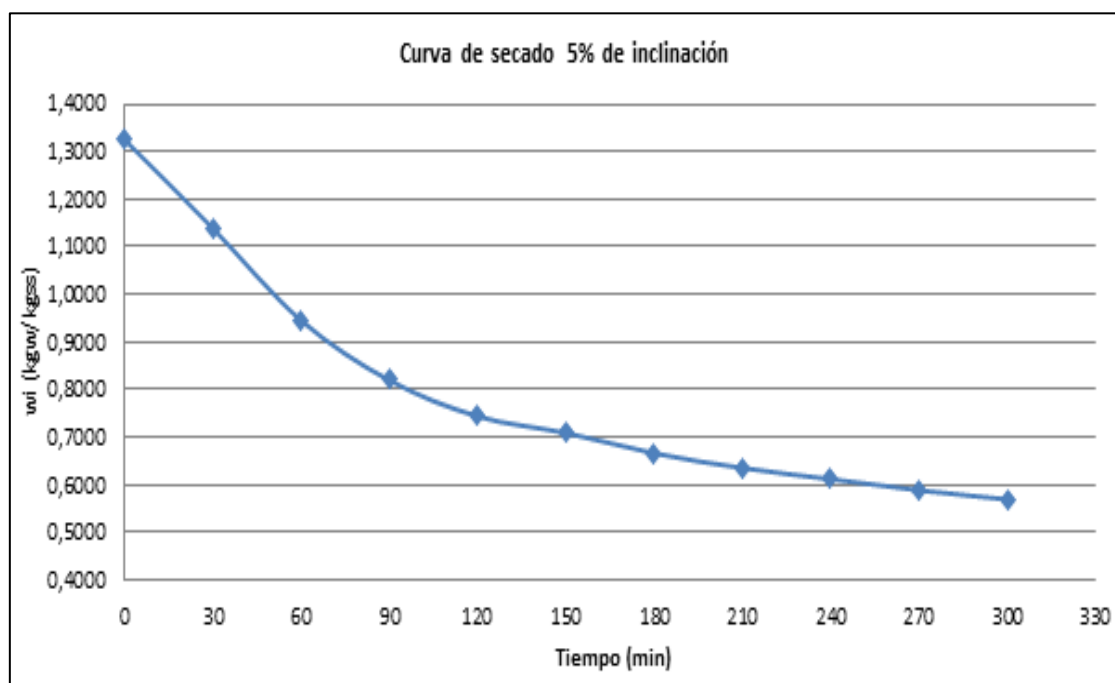


Fig. 82: Curva de secado con el 5% de inclinación realizada en Cuenca, fuente propia

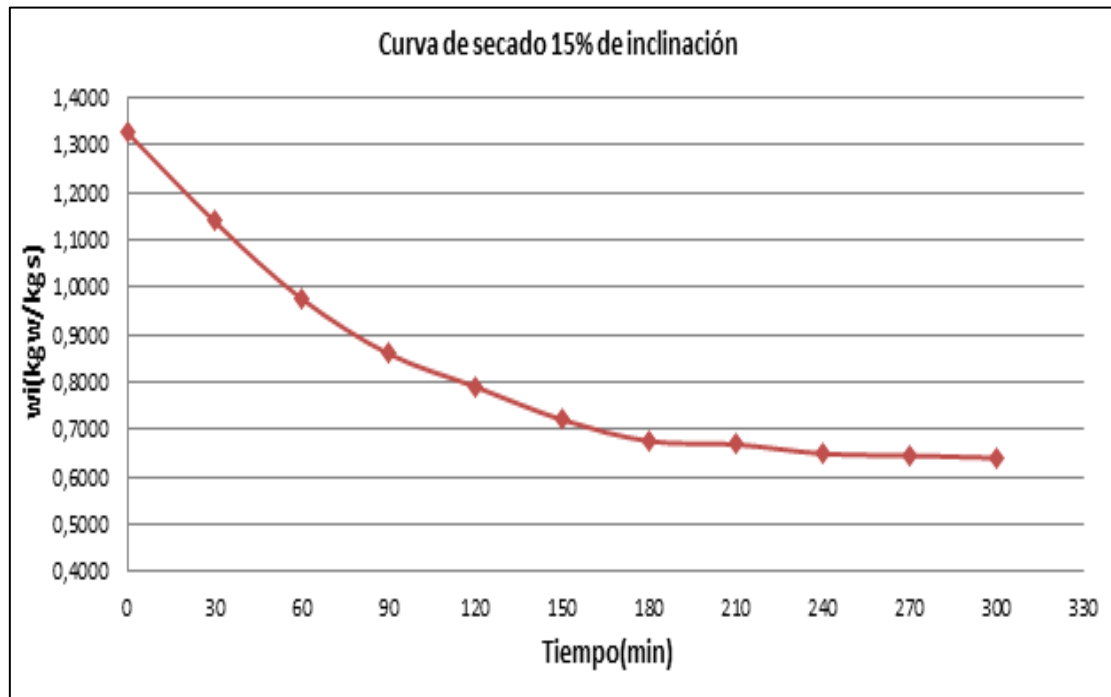


Fig. 83: Curva de secado con el 15% de inclinación realizada en Cuenca, fuente propia

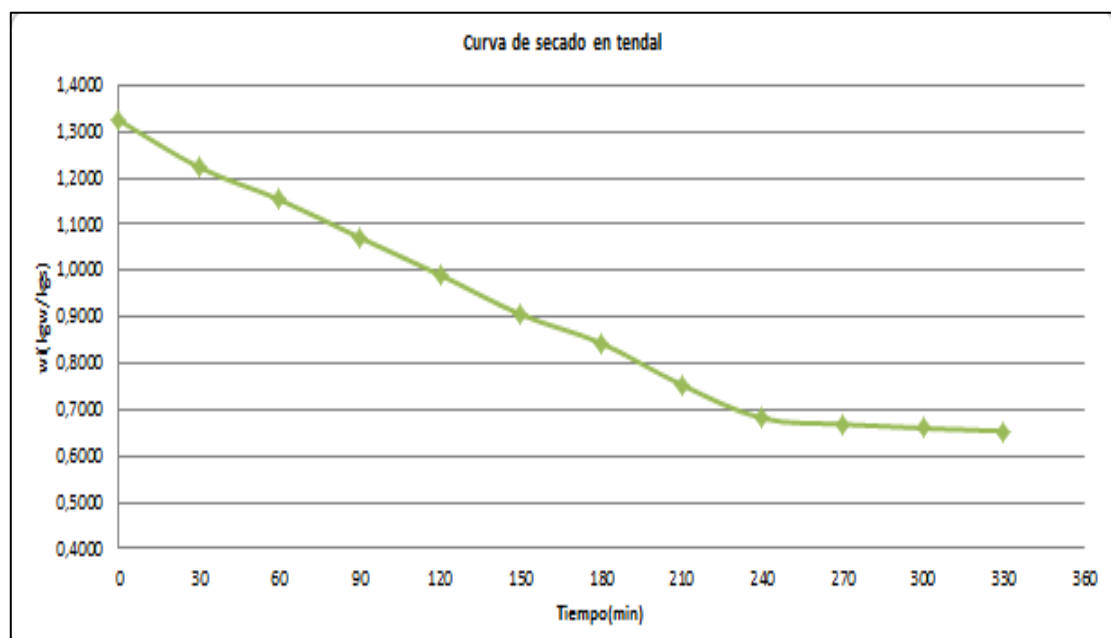
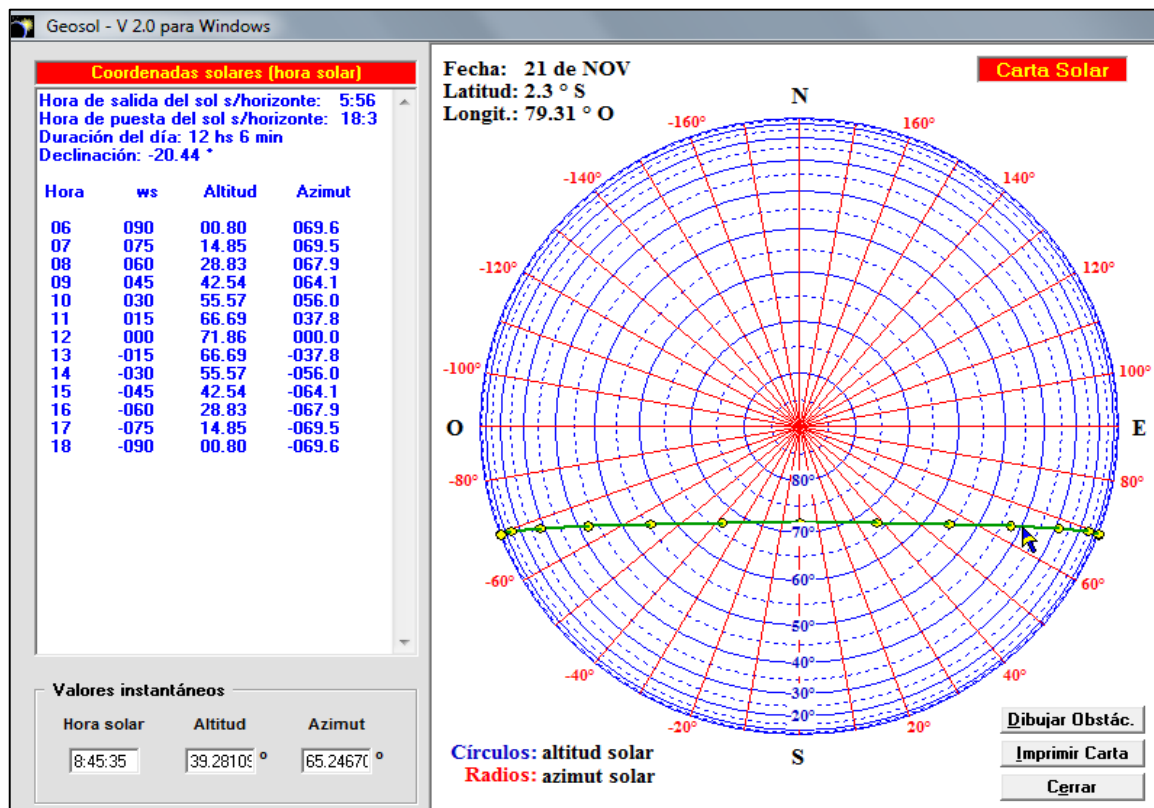
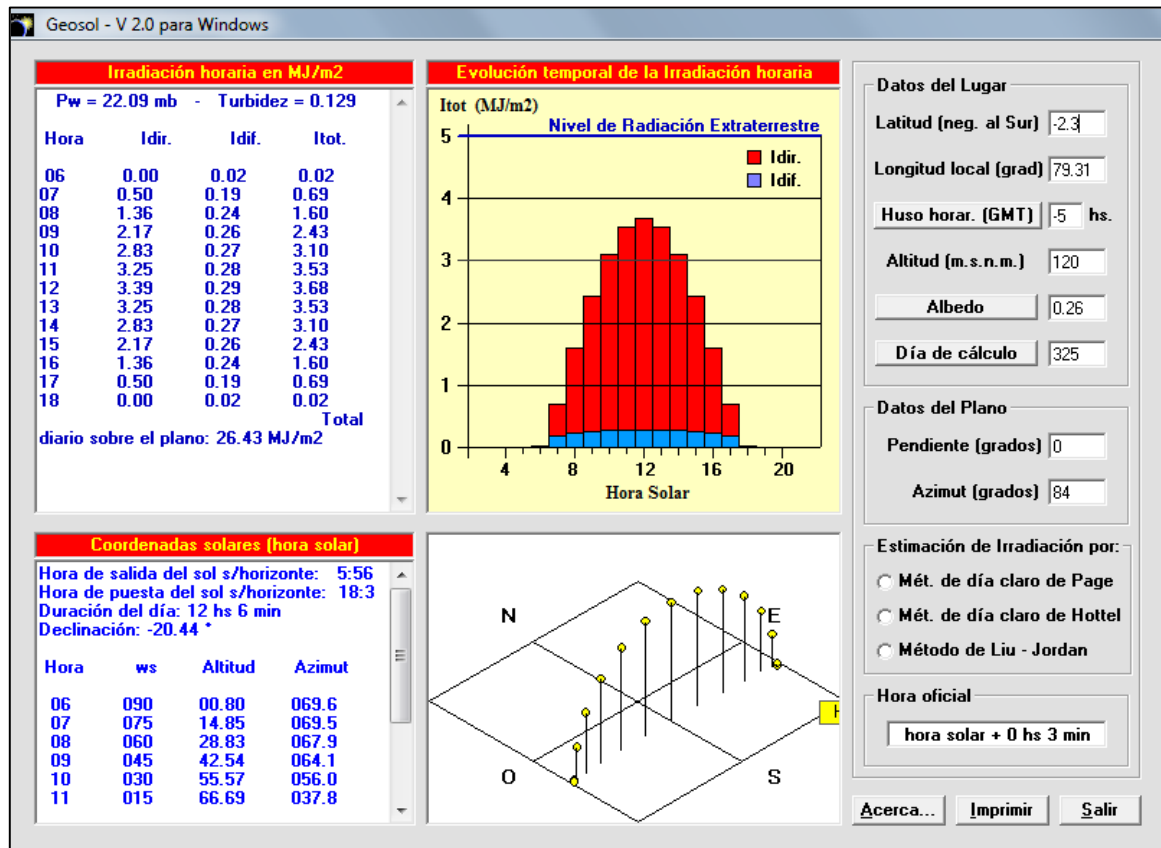


Fig. 84: Curva de secado en tendal realizada en Cuenca, fuente propia



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*

## Anexo 5: Radiación solar software GEOSOL V 2.0



## Anexo 6: Archivo fotográfico



Fig. 85: Zeolita colocada en la base del secador solar, fuente propia



Fig. 86: Proceso preliminar de secado realizado en la ciudad de Cuenca el 11/11/2012, fuente propia





Fig. 87: Recolección del cacao durante el proceso de secado, fuente propia



Fig. 88: Proceso de secado realizado en el canton La Troncal, provincia de Cañar el 19/11/2012, fuente propia



Fig. 89: Cacao CCN-51 durante el proceso de secado, fuente propia



Fig. 90: Secado solar inclinado, fuente propia



Fig. 91: Controles de humedad relativa dentro del secador solar inclinado, fuente propia