

CINÉTICA DEL SECADO EN LAS ALMENDRAS FERMENTADAS DE CACAO (THEOBROMA CACAO L.) VARIEDAD CCN51

William Fabián Teneda Llerena

Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador
wf.teneda@uta.edu.ec

RESUMEN:

El propósito de esta investigación es presentar un análisis de la cinética del proceso de secado de los granos de cacao aplicando la Segunda Ley de Fick, para lo cual se trabajó con almendras de cacao con 8×10^{-3} m de espesor y una humedad inicial aproximada de 54%. Los factores considerados en el diseño experimental 2^4 fueron el tipo de secado (tendales y ambiente), presecado a 60°C por 3 horas, hoja de plátano y lavado de mucílago. Los factores que mostraron un efecto significativo en el coeficiente de difusividad, a un nivel de confianza del 95% fueron el tipo de secado y presecado a 60°C , por lo tanto, el tratamiento que produjo una más fácil remoción de agua en los granos de cacao fue $a_1b_0c_0d_1$ cuyo coeficiente de difusividad fue $2.06 \times 10^{-10} \pm 2.50 \times 10^{-11}$ m²/s correspondiente a secado al ambiente a $29.81 \pm 2.60^\circ\text{C}$. Además, no se encontró diferencia significativa en la acidez total de los tratamientos resultantes, por ende estos resultados sirven de base para determinar las condiciones del secado al ambiente de los granos de cacao dentro de la Asociación de productores de Cacao APROCAI para mantener su calidad.

Palabras clave: secado, coeficiente de difusividad, granos de cacao, acidez total

ABSTRACT:

The aim of this research was to assess the kinetics of the drying process of cocoa beans by the application of Fick's Second Law. To do so, 8×10^{-3} m thickness cocoa beans with an initial moisture content of 54% were used. The experimental design 2^4 included the following factors; drying process type (sheet spread and environment), pre-drying at 60°C for 3 hours, usage of banana leaves, and mucilage washing. The factors which show a significant effect on the experimental diffusion coefficient at a confidence level of 95% were the drying process type and pre-drying at 60°C for 3 hours. Hence, the experimental treatment which released water from cocoa beans more easily was $a_1b_0c_0d_1$ which diffusion coefficient reached $2.06 \times 10^{-10} \pm 2.50 \times 10^{-11}$ m²/s when the drying process was performed at room temperature ($29.81 \pm 2.60^\circ\text{C}$). Furthermore, there was no significant difference in total acidity between treatments; therefore, these results constitute the basis to explore the best drying conditions for cocoa beans at room temperature at Association of Cocoa Producers APROCAI in order to maintain their quality.

Keywords: drying, diffusion coefficient, cocoa beans, total acidity

El autor agradece a la Universidad Técnica de Ambato -Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y al Centro de Investigaciones Científicas por financiar el proyecto a través; a la Asociación de productores de Cacao APROCAI junto con la colaboración oportuna de docentes y estudiantes de Séptimo, Octavo y Noveno semestre de esta distinguida institución que permitieron ejecutar el proyecto de vinculación con la colectividad en el periodo marzo 2011 – marzo 2012. De igual manera a la Dra. Cecilia Carpio, Ing. Ximena Mariño, Ing. Araceli Pilamala e Ing. Ms.C Juan de Dios Alvarado por el aporte técnico y científico en la presente investigación.

Artículo Recibido: 15 de agosto de 2013

Artículo Aceptado: 30 de noviembre de 2013

1. Introducción /

El cacao es de gran importancia en las actividades agrícolas del Ecuador, constituye el tercer producto de exportación que genera fuentes de trabajo directas e indirectas. Es parte esencial de la cotidianidad de muchas comunidades. Solo el 5% del cacao producido en el mundo es fino. De este porcentaje, más del 65% proviene del Ecuador, lo que lo convierte en el mayor productor de cacao fino en el mundo [1].

La necesidad de disminuir las pérdidas post-cosecha, además del valor agregado que puede adquirir un producto, son parámetros importantes a tomar en consideración en países en vías de desarrollo, especialmente ahora, cuando las necesidades de mayor producción de alimentos se han incrementado, y los ingresos de las clases sociales dedicadas al cultivo de productos agrícolas son bajos [2]. La cinética del secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material, y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo [3].

La práctica de secado del grano de cacao tiene como fin primordial detener la actividad enzimática. Durante este proceso ocurren además reacciones químicas que disminuyen el amargor y la astringencia en el grano de cacao. Generalmente la humedad se reduce del 45-60% (base húmeda) al finalizar la fermentación al 7-8% necesario para su manipulación y almacenamiento. Si la humedad final es menor, la almendra se torna quebradiza, y si es mayor puede sufrir infecciones futuras y permitir la proliferación de bacterias y hongos [4].

La velocidad y temperatura de secado son esenciales para mantener activas las reacciones de oxidación de alcoholes y la de otros compuestos producidos durante la fermentación del cacao, que son importantes para su sabor y aroma. Sin embargo, muchos de los problemas relacionados con la estabilidad de la almendra de cacao durante su almacenamiento están íntimamente relacionados con el contenido final de humedad y la actividad de agua [5].

Variables como el tiempo, temperatura y humedad establecen la efectividad del secado de cacao y permiten a la vez la posibilidad de disminuir el tiempo de secado industrial sin afectar las propiedades organolépticas, al modificar la humedad y la temperatura como lo demuestran pruebas experimentales de secado y análisis computacional utili-

zando el método de elementos finitos para estudiar el proceso de secado [6].

El proceso de secado de granos de cacao fermentado (*Theobroma cacao* L.) en un secador de bandejas con convección forzada de aire estableció que las cinéticas de secado se ajustaron a un modelo de tipo exponencial, observándose además el período de velocidad constante y el período de velocidad decreciente en dos etapas (períodos post-crítico I y post-crítico II) del proceso de secado para espesores de 1.03 y 2.41 cm [4].

Los datos de relación de humedad obtenidos desde el cambio de contenido de humedad con el tiempo de secado se ajustaron a un modelo de secado de dos capas delgadas con buenos resultados, a la vez la segunda ley de difusión de Fick permite predecir la difusividad efectiva usando datos experimentales, asumiendo que la variación de difusividad con la temperatura puede ser expresada por una función tipo Arrhenius, cuyos valores de difusividad obtenidos variaron de 6.137×10^{-10} a 2.1855×10^{-9} m² s⁻¹ para la temperatura usada [7]. El presente trabajo tiene por objetivo obtener datos de la cinética del secado de cacao fermentado (*Theobroma cacao* L.).

2. Materiales y/o Métodos /

Se empleó cacao (*Theobroma Cacao* L.) variedad CCN51 proveniente de la Asociación de productores de Cacao APROCAI, ubicado en el Cantón Cumandá de la provincia de Chimborazo-Ecuador, cuya altitud varía de 300 hasta 1900 msnm aproximadamente, con una temperatura promedio de 20° C. La metodología empleada en el presente trabajo, contempló la determinación de la humedad de equilibrio de los tipos de secado (tendales y ambiente) y la realización de las pruebas de secado de acuerdo al diseño experimental 24 planteado.

Para la determinación de humedad de equilibrio [xe] se inició con la medición de la humedad relativa y las temperaturas de ambos tipos de secado (tendales y ambiente) cada hora por el lapso de 44 horas, para su efecto se empleó el modelo matemático modificado planteado por Henderson:

$$x_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1-\emptyset)}{-c_1(T+c_2)} \right]^{1/c_3}$$

Dónde: la humedad relativa • se expresa en decimal y la temperatura T en °C.

Los valores de los parámetros de la ecuación de Henderson modificada son 4.1942, 0.0 y 2.7296 correspondiente a c1, c2 y c3 respectivamente. Para obtener el peso seco del grano de cacao inicialmente se consideró factores como presecado a 60°C por 3 horas (sin y con), hoja de plátano (sin y con) y lavado del mucílago (sin y con) antes de ser colocados en el equipo de secado (tendales y ambiente), en donde el producto estaría sujeto a características ambientales de temperatura y humedad relativa fluctuantes entre 30.71±3.41°C y 59.00±9.18 [%] para tendales y 29.81±2.6°C y 58.57±8.93 [%HR] para el ambiente, expuestos durante 45 horas.

Para la medición del peso de las muestras se utilizó una balanza con un margen de error de ±0.001 g. Una vez obtenido el peso seco de los productos, se determina el contenido de humedad en base húmeda y a continuación la razón de contenido de humedad [x*] aplicando la siguiente ecuación:

$$x^* = \frac{x - x_e}{x_o - x_e}$$

Dónde x es el contenido de humedad en un instante cualquiera, xo es el contenido de humedad inicial. Para modelar la cinética de secado del grano de cacao se empleó la ecuación de la segunda ley de Fick, cuya solución en el caso de una placa plana, considerando que la migración de la humedad es causada por la difusión, sin encogimiento, y bajo coeficientes de difusión y temperatura constantes, es la siguiente [2]:

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$$

Normalmente, esta ecuación se puede simplificar considerando únicamente el primer término de la serie. De tal forma que obtenemos:

$$\ln \frac{M}{M_o} = \ln \frac{8}{\pi} - \left[\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$$

Esta ecuación permite calcular la difusividad efectiva de un producto a través de graficar los datos experimentales del proceso de secado en términos del Ln (x*) contra el tiempo de secado, tal como se indica en la Figura 1.

El coeficiente de difusividad es una difusividad efectiva que engloba los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua y su valor es calculado siempre a través de un modelo matemático ajustando los valores experimentales. Puede entenderse la difusividad como la facilidad con que el agua es removida del material [3].

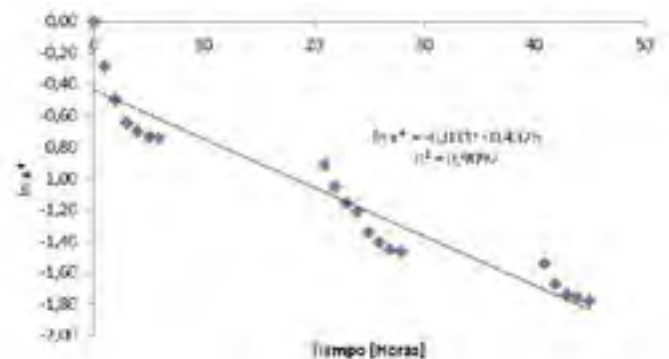


Figura 1. Relación del Ln x* con respecto al tiempo para el Secado al ambiente sin presecado a 60°C por tres horas sin hoja de plátano y con lavado de mucílago.

La determinación de acidez total mediante la norma INEN 381 fue realizada a diferentes tiempos (0, 4, 21, 25 y 41 horas) de cada una de las combinaciones resultantes en el estudio. Los resultados obtenidos permitieron la comparación de medias mediante el análisis de varianza empleando la prueba de Tukey (p ≤ 0.05) a través de la aplicación del paquete estadístico STATGRAPHICS CENTURION®.

3. Resultados /

En la Figura 2, se observa que el secado tanto al ambiente como en tendal no presenta diferencia significativa en la relación entre humedad relativa [%] y temperatura [°C] durante las 44 horas aplicadas al proceso, por lo que mediante la ecuación de Henderson modificada, se estableció los valores de humedad de equilibrio (xe) de los dos tipos de secado a emplearse en el estudio (ambiente y tendal) cuyos valores fueron 1.631* 10-03 y 1.640* 10-03 respectivamente. El contenido inicial de humedad de los granos de cacao fue de alrededor del 54% antes del secado.

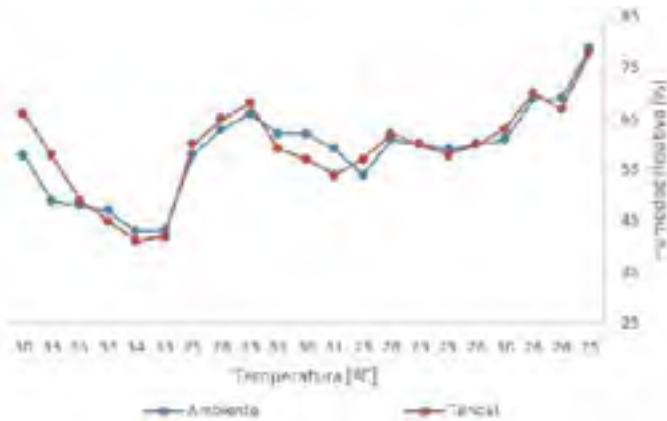


Figura 2. Relación Humedad Relativa [%] y Temperatura [°C] de los tipo de Secado (tendal y ambiente) a emplearse

En la Figura 3 se presenta la variación del contenido de la humedad en granos de cacao en función del tiempo de secado de los tratamientos más significativos de las combinaciones resultantes en el estudio.

Se aprecia que el tratamiento (a1b0c1d0) que corresponde a secado al ambiente sin presecado (60°C por 3 horas) con hoja de plátano y sin lavado de mucílago tuvo menor contenido de humedad (5 g. de agua por g de producto) sin embargo el tratamiento más idóneo fue el secado al ambiente sin presecado (60°C por 3 horas) con hoja de plátano y con lavado de mucílago cuyo valor fue 7.8 g de agua por g de producto, lo cual está dentro del rango 7% – 8% de humedad que se requiere para la manipulación y almacenamiento del grano de cacao.

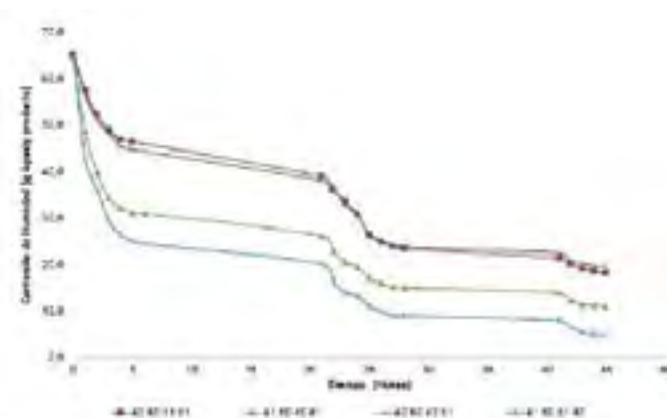


Figura 3. a0= Tendales; a1= Ambiente; b0= Sin presecado (60°C por 3 horas); b1= Con presecado (60°C por 3 horas); c0= sin hoja de plátano; c1= con hoja de plátano; d0= sin lavado de mucílago; d1= con lavado de mucílago

A la vez se observó que los granos de cacao secados en tendales son los que presentaron mayor contenido de humedad oscilando entre 11g – 21 g agua / g. producto.

Posteriormente, a partir de la aplicación de la Segunda Ley de Fick, se estableció el valor del coeficiente de la difusividad efectiva para los granos de cacao, cuyos resultados se enlistan en la Tabla 1 con altos valores de R2, al presentarse diferencia significativa entre réplicas a un nivel de confianza de 95%.

Tabla 1. Valores de la difusividad efectiva para granos de cacao.

TRATAMIENTO	REPLICA I	REPLICA II	R ²
a ₁ b ₁ c ₁ d ₁	4.11E-11	4.76E-11	0.924
a ₀ b ₁ c ₁ d ₁	4.11E-11	4.61E-11	0.907
a ₁ b ₀ c ₁ d ₁	6.56E-11	2.69E-10	0.826
a ₀ b ₀ c ₁ d ₁ *	1.37E-10	1.83E-10	0.938
a ₁ b ₁ c ₀ d ₁	4.40E-11	4.68E-11	0.936
a ₀ b ₁ c ₀ d ₁	3.53E-11	3.75E-11	0.789
a ₁ b ₀ c ₀ d ₁ *	1.88E-10	2.23E-10	0.902
a ₀ b ₀ c ₀ d ₁ *	1.51E-10	1.69E-10	0.928
a ₁ b ₁ c ₁ d ₀	4.32E-11	4.90E-11	0.881
a ₀ b ₁ c ₁ d ₀	3.17E-11	3.67E-11	0.825
a ₁ b ₀ c ₁ d ₀ *	1.82E-10	3.27E-10	0.903
a ₀ b ₀ c ₁ d ₀	1.17E-10	1.53E-10	0.917
a ₁ b ₁ c ₀ d ₀	7.21E-12	7.21E-12	0.100
a ₀ b ₁ c ₀ d ₀	3.46E-11	3.67E-11	0.866
a ₁ b ₀ c ₀ d ₀	1.35E-10	1.52E-10	0.852
a ₀ b ₀ c ₀ d ₀	1.20E-10	1.32E-10	0.917

*Valores más significativos de coeficiente de difusividad

Por consiguiente se aprecia que los tratamientos que presentaron mayor facilidad de remoción de agua en los granos de cacao fueron a0b0c1d1, a1b0c0d1, a0b0c0d1 y a1b0c1d0, de los cuales se destaca el tratamiento a1b0c0d1 cuyo valor de coeficiente de difusividad fue $2.06 \cdot 10^{-10} \pm 2.50 \cdot 10^{-11}$ m²/s muy diferente al reportado en secado natural y artificial de cacao ecuatoriano de $6.67 \cdot 10^{-10}$ y $7.68 \cdot 10^{-10}$ m²/s respectivamente [8], por lo que se confirma que este valor varía conforme cambian las condiciones de secado (temperatura y velocidad del aire), sin depender de modo exclusivo del material.

En literatura se han publicado datos en los últimos 15 años sobre valores de coeficientes de difusión de algunos materiales comunes, y señalan que la difusividad de los ali-

mentos normalmente se ubica en un rango de 10-13 a 10-6 m²/s, y la mayoría de ellos (82%) están acumulados en la región de 10-11 a 10-8 por lo que se asume que los valores obtenidos son aceptables al estar dentro del rango de valores comunes reportados por otros investigadores [9].

Estadísticamente se determinó que el tipo de secado y presecado (60°C por 3 horas), tienen un efecto significativo sobre el coeficiente de difusividad con un 95.0% de nivel de confianza. Con respecto a la valoración de acidez total [g de ácido esteárico (C₁₈H₃₆O₂) /litro de muestra] se obtuvo que a partir de las 21 horas recién se observa variación de este valor, que en algunos casos se mantiene constante hasta culminar el proceso de secado, tal como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Variación de Acidez Total [g/L] en los respectivos tratamientos.

TRATAMIENTO	TIEMPO [HORAS]				
	0	4	21	25	41
a ₀ b ₀ c ₀ d ₀	2.84E-03	2.84E-03	4.27E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₀ c ₀ d ₀	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₀ b ₁ c ₀ d ₀	5.69E-03	5.69E-03	8.53E-03	8.53E-03	8.53E-03
a ₁ b ₁ c ₀ d ₀	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	9.96E-03	9.96E-03
a ₀ b ₀ c ₁ d ₀	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	8.53E-03	8.53E-03
a ₁ b ₀ c ₁ d ₀	2.84E-03	2.84E-03	2.84E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₀ b ₁ c ₁ d ₀	2.84E-03	2.84E-03	2.84E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₁ c ₁ d ₀	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	8.53E-03	8.53E-03
a ₀ b ₀ c ₀ d ₁	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₀ c ₀ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	2.84E-03	8.53E-03	8.53E-03
a ₀ b ₁ c ₀ d ₁	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₁ c ₀ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	4.27E-03	5.69E-03	8.53E-03
a ₀ b ₀ c ₁ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	2.84E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₀ c ₁ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	2.84E-03	5.69E-03	8.53E-03
a ₀ b ₁ c ₁ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	4.27E-03	5.69E-03	5.69E-03
a ₁ b ₁ c ₁ d ₁	2.84E-03	2.84E-03	4.27E-03	8.53E-03	8.53E-03

a₀= Tendales; a₁= Ambiente; b₀= Sin presecado (60°C por 3 horas); b₁= Con presecado (60°C por 3 horas); c₀= sin hoja de plátano; c₁= con hoja de plátano; d₀= sin lavado de mucílago; d₁= con lavado de mucílago

Estadísticamente no se encontró diferencia significativa de los factores de estudio (tipo de secado, presecado, hoja de plátano y lavado de mucílago) sobre el valor de acidez total con un 95.0% de nivel de confianza, sin embargo en estudios similares se presentó diferencia significativa entre la condición de fermentación y tipo de secado presentando valores de 0.124 meq NaOH/ g en secado natural y 0.169 meq NaOH/ g en secado artificial, mientras que en otros estudios se menciona valores de 0.316 y 0.438124 meq NaOH/ g respectivamente, de igual manera en muestras

de cacao ecuatoriano se presentó un valor de 0.109 meq NaOH/ g y el rango de variación entre genotipos de cacao está comprendido entre 1.10 a 1.51 (±0,15) de meq de NaOH/ g de muestra.

En el secado, el pH se incrementa debido a la pérdida de ácidos conjuntamente con la evaporación del agua. Además, los compuestos fenólicos disminuyen por difusión fuera del cotiledón y por la formación de complejos con las proteínas y los polisacáridos.

4. Conclusiones /

Se determinó que el tipo de secado (tendal y ambiente) y presecado afecta significativamente al coeficiente de difusividad efectiva de los granos de cacao durante el proceso de secado, encontrando excelente concordancia con valores reportados en estudios de secado en alimentos. El mejor proceso de secado se encontró en secado al ambiente sin presecado (60°C por 3 horas) con hoja de plátano y con lavado de mucílago, siendo las condiciones adecuadas de secado de los granos de cacao dentro de la Asociación de productores de Cacao APROCAI para mantener la calidad del mismo.

Referencias /

- [1] El Plan de Cacao, producción social y ambientalmente responsable (2011). Nestlé, Good food, Good life. Disponible en:<<http://ww1.nestle.com.ec/csv/desarrollo-rural/plancaca> o> Consultado: 07/2013
- [2] Hernández, J., Quinto, P., Flores, F., Acosta, R., & Aguilar, J. O. (2010). Cinética del Secado de Productos Agrícolas. XII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y Sistemas, 308-312. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional. México DF.
- [3] Giraldo-Zúñiga, A.D., Arévalo-Pinedo, A., Ferreira Silva, A., Ferreira Silva, P., Valdés-Serra, J.C. & De Menezes Pavlak, M.C. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. Ciênc. Tecnol. Aliment., Vol.30, N.1, 179-182
- [4] Lara, B. G. (2011). Evaluación del proceso de secado de granos de cacao fermentado, en un secador de bande-

jas con convección forzada de aire. Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente, Barcelona, como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Químico.

- [5] Liendo, R. J. (2005). El secado del cacao. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Maracay (Venezuela). Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias
- [6] Tinoco, H. A., & Ospina, D. Y. (2010). Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. *Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 53-63.
- [7] Chinenye, N. M., Ogunlowo, A. S., & Olukunle, O. J. (2010). Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) drying kinetics. *Chilean Journal of Agricultural Research*, Vol. 70, 633-639.
- [8] Gaibor N., A. J. (1991). Fermentación y Secado de tres variedades de Cacao cultivadas en Ecuador. Universidad Técnica de Ambato-Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.
- [9] Marinos-Kouris, D., & Maroulis, Z. B. (1995). Transport properties in the drying of solids. *Handbook of industrial drying*, Vol. 1, 113-159.
- [10] Chaiseri, S. & Dimick, P.S. (1989). Lipid and hardness characteristics of cocoa butters from different geographic regions. *Journal of the American Oil Chemists' Society* Vol. 66 N.12, 1771-1776.
- [11] Pérez E., Á. C. (2002). Caracterización Física y Química de Granos de Cacao. *Agronomía Tropical* Vol. 52, N. 2, 161-172.