



Cambios fisicoquímicos y organolépticos en el tostado del cacao

Physicochemical and organoleptic changes in cocoa roasting

Mudanças físico-químicas e organolépticas na torrefação do cacau

Vladimir Rejas Heredia

vladirejas@gmail.com

ORCID 0000-0002-8405-6815

Universidad Mayor Real, La Paz; Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre-Bolivia

Artículo recibido 18 septiembre 2020 | Arbitrado del 9 al 23 octubre 2020 | Publicado el 1 enero 2021

RESUMEN

El proceso de tostado de la pepa de cacao influye considerablemente en la calidad de los productos derivados, es así como esta investigación se propuso obtener un modelo de control de fenómenos fisicoquímicos que definen el tostado de esta pepa, mediante un estudio experimental validado por diseños factoriales, en una fábrica de chocolates de la ciudad de Sucre, Bolivia. Se efectuaron cuatro series de pruebas, tomando en análisis: humedad de la pepa de cacao, acidez, viscosidad del licor de cacao y parámetros organolépticos. Se logró facilitar el molido dada la reducción de la humedad residual, acortar la etapa de desacidificación debido a la reducción del contenido de acidez del licor de cacao, elevar la calidad y reducir la cantidad de manteca de cacao para la producción de chocolate gracias a la reducción de su viscosidad. El modelo es aplicable en fábricas de chocolate que cuenten con tecnología similar.

Palabras clave: Tostado del cacao; cambio fisicoquímico; deshidratación eficiente de la pepa de cacao; estudio Experimental; fabricación de chocolate

ABSTRACT

The roasting process of the cocoa bean has a considerable influence on the quality of the derived products; this is how this research set out to obtain a control model of the physicochemical phenomena that define the roasting of this bean, through an experimental study validated by factorial designs, in a chocolate factory in Sucre, Bolivia. Four series of tests were carried out, taking into analysis: cocoa bean moisture, acidity, viscosity of the cocoa liquor and organoleptic parameters. It was possible to facilitate grinding given the reduction of residual humidity, shorten the deacidification stage due to the reduction of the acidity content of the cocoa liquor, raise the quality and reduce the amount of cocoa butter to produce chocolate thanks to the reduction its viscosity. The model is applicable in chocolate factories that have similar technology.

Key words: Cocoa roasting; physicochemical change; experimental study; chocolate making

RESUMO

O processo de torra do grão de cacau tem uma influência considerável na qualidade dos produtos derivados, é assim que esta pesquisa se propôs a obter um modelo de controle dos fenômenos físico-químicos que definem a torra deste grão, através de um estudo experimental validado por fatoriais designs, em uma fábrica de chocolates na cidade de Sucre, Bolívia. Foram realizadas quatro séries de testes, levando em consideração: umidade do grão de cacau, acidez, viscosidade do licor de cacau e parâmetros organolépticos. Foi possível facilitar a moagem dada a redução da umidade residual, encurtar a etapa de desacidificação devido à redução do teor de acidez do licor de cacau, elevar a qualidade e reduzir a quantidade de manteiga de cacau para a produção de chocolate graças à redução de sua viscosidade. O modelo é aplicável em fábricas de chocolate que possuem tecnologia semelhante.

Palavras-Chave: Torrefação do cacau; mudança físico-química; estudo experimental; fabricação de chocolate

INTRODUCCIÓN

Hasta épocas relativamente recientes la fabricación del chocolate era una industria artesanal que dependía de la destreza de su mano de obra. Solo cuando el chocolate se empezó a producir masivamente, se dividieron los procesos combinados de amasado, trituración y conchado en partes aisladas y se estudiaron por separado. Con el desarrollo tecnológico, la necesidad de aumentar la capacidad de producción y la consiguiente automatización de la maquinaria se hizo necesario incrementar y mejorar la comprensión sobre los principios que gobiernan los procesos implicados. Las técnicas de producción actual se desarrollaron mediante pruebas y modificaciones constantes y por medio de la investigación dirigida por los descubrimientos y pruebas en el área de fabricación del chocolate (Varas, 2010).

La tendencia actual del consumidor a comprar productos de mayor calidad y a menor precio, demanda constantes esfuerzos de parte del productor. En vista del considerable precio, que además tiende a incrementarse, y las fluctuaciones de calidad de la materia prima, ha sido necesario tratar de mejorar la fabricación, producción y automatización en la industria del chocolate.

Es así, que la industrialización del chocolate se ha ido mecanizando e incrementando la aplicación de la ciencia y de la tecnología para controlar las plantas de producción y conseguir que funcionen eficazmente. Los fabricantes de equipos están produciendo continuamente nueva maquinaria mientras aumenta la literatura con nuevos métodos de fabricación y con patentes sobre técnicas mejoradas, Varas (2010).

En Bolivia se utilizan métodos tradicionales de fabricación y no sería

factible para los productores deshacerse de sus equipos y tratar adquirir maquinaria de última tecnología, no solo por el costo elevado y la falta de mano de obra preparada para el manejo de dicha maquinaria, sino también por las limitaciones en la aplicación del conocimiento científico en la producción, fundamentada en investigación propia, es decir, para el medio. Asimismo, el proceso de desodorización por alcalinización es altamente complejo y requiere de medios que no están al alcance de estas empresas. Influyen en ello, los altos precios de la maquinaria, las dificultades de importación e incorporación de tecnologías y finalmente, las dimensiones mínimas de los equipos existentes en oferta.

Por lo expuesto, esta investigación se propuso obtener un modelo de control de fenómenos fisicoquímicos que definen el tostado de la pepa de cacao y por tanto la calidad de los productos derivados. El modelo fue validado en una fábrica líder en la producción de chocolates de la ciudad de Sucre, Bolivia. Gracias a esta colaboración se contó con toda la maquinaria y tecnología usada para la producción de Chocolate, asimismo se recibió asesoramiento técnico y personal capacitado en su correcto uso. Fue posible participar del proceso de producción, tal como se da en la realidad, sin alteraciones.

Este estudio se justifica porque permitirá a las empresas de productos derivados del cacao en Bolivia, elevar la eficiencia productiva invirtiendo poco en su implementación, puesto que es más eficiente incrementar el conocimiento existente sobre los fenómenos físicos y químicos para adecuar la tecnología existente, antes de tratar de cambiar un tipo de proceso, Healy (2001). Es por tanto importante para estas empresas, consolidar el conocimiento que se

tiene sobre los métodos de desodorización probados satisfactoriamente en el pasado, obteniendo el modelo de control de las variables involucradas anteriormente mencionadas.

Aquí subyace la gran importancia de la investigación, por su impacto en los productos derivados y el considerable mejoramiento de la calidad de la pasta de chocolate base.

Para los fines del estudio, es importante conocer la naturaleza del cacao, así como los procesos de cosecha, fermentación, secado, molienda, licor de cacao, conchado y chocolate. Asimismo, es importante remarcar que conocen 3 tipos diferentes de cacao: forastero, criollo y trinitario, Beckett (1988).

Cosecha, fermentación y secado, después de alrededor de cuatro meses las mazorcas de cacao maduran y se cosechan, no todas maduran al mismo tiempo, por lo que la recolección se realiza generalmente en un periodo de varios meses. Las mazorcas maduran completamente una semana después y solo entonces se abren, se retira parte de la pulpa que se encuentra entre las columnas de semillas o pepas de cacao y se descarta junto con la vaina, Beckett (1988) y Callebaut (1992).

Terminada la fermentación se procede a la desecación de las pepas que entonces se encuentran razonablemente libres de pulpa adherente, pero tienen aún cierto contenido de humedad y están algo blandas. Las pepas se secan esparciéndolas en capas de algunos centímetros de espesor y exponiéndolas al sol durante varios días, se rastrillan a intervalos para continuar con el volteo y desprendimiento de los fragmentos que quedan adheridos, se apilan por la noche y se protegen cuando llueve. La presencia de madera y fibras en el tostador puede

conducir a un brote de fuego; arena, piedra y metal pueden dañar la amasadora de mezclado, los molinos de rodillo y los rodillos de refinado, derivando en consumo de tiempo y reducción de capacidad por reparaciones. La arena de silicio de la cáscara de algunas pepas puede ser muy perjudicial si aparece en el producto final, incrementando la insolubilidad de la ceniza en un 0,3% y contribuyendo al desgaste de la maquinaria. Para mantener la calidad del producto, así como para proteger la maquinaria, es esencial eliminar estas impurezas por completo, para ello se emplean tamices de varias mallas, cepillos, columnas de aire y separadores magnéticos, Beckett (1988), Minifie (1980) y Meiners (1984).

Molienda, licor de cacao, conchado y chocolate, el cotiledón de cacao así obtenido se puede moler directamente a licor de cacao. Ahora es posible llevar a cabo la mezcla de los ingredientes para preparar el chocolate, éstos se seleccionan de acuerdo con el tipo de chocolate requerido. Al licor de cacao se añade azúcar molida o granulada y se amasa con mantequilla de cacao extra, también leche en polvo si es que se ha de preparar chocolate con leche, Beckett (1988) y Callebaut (1992). Según Beckett (1988), Callebaut (1992) y Gianola (1983), la etapa siguiente es el "conchado" donde culmina el desarrollo de sabor, se trata de una operación de amasado relativamente larga que se realiza en una máquina llamada "concha" que es una especie de amasadora gigante, dispuesta de modo que brinde fuerzas de cizalladura durante el mezclado, calentamiento y aeración por medio de las cuales se obtiene la textura, sabor y aroma finales. Se reduce el amargor dando paso a otros matices de sabor que quedarán más pronunciados.

Cacao en polvo y mantequilla de cacao, según Beckett (1988), para producir cacao en polvo a partir de licor de cacao rico en grasa, éste ha de ser parcialmente desengrasado, que es lo que ocurre cuando se extrae la mantequilla de cacao. Las prensas horizontales están constituidas por depósitos individuales dispuestos horizontalmente que se llenan bombeando el licor de cacao finamente molido y calentado a 194-212°F (90-100°C) con una bomba proyectada específicamente para ello y al presionar en los émbolos de acero, sale exprimida la mantequilla de cacao. Queda así una masa comprimida llamada torta de cacao que se expulsa automáticamente después del prensado y que normalmente contiene un 10-20% (12-25% Minifie 7) de grasa residual. Por su parte, la mantequilla de cacao de cotiledón es de color amarillo claro, presenta una textura quebradiza por debajo de 68°F (20°C), con un punto de fusión claramente definido de alrededor de 95°F (35°C) y una fusión incipiente de 86°-90°F (30°-32°C). Es importante que durante el prensado no se formen capas duras que constituirían obstáculos para el paso de la mantequilla de cacao y que la grasa producida sea tan clara como sea posible, para conseguir esto se ha de aumentar lentamente la presión, Beckett (1988) y Minifie (1980).

Proceso de tostado, después de una limpieza preliminar las pepas de cacao son térmicamente tratadas, el método que comúnmente se emplea es aquel en el que el cacao crudo primero se seca superficialmente en un tostador cumpliendo con: a) Separar la cascarilla del cotiledón. b) Eliminar tanta humedad residual en el cotiledón como sea posible. c) Prevenir la migración de mantequilla de cacao desde el cotiledón a la cascarilla. d) Predisponer a la

pepa de cacao para llevar a cabo el desarrollo de sabor en el cotiledón casi completamente separado de la cáscara. e) Satisfacer los requerimientos microbiológicos necesarios para estar dentro de las regulaciones de fabricación de los productos.

El método natural de desacidización (Contribución de Barth Ludwigsburg), en concordancia con Meiners (1984), el método natural de desacidización consiste en la disminución de la acidez aprovechando el contenido de humedad de la pepa de cacao e independientemente del tipo de proceso térmico aplicado, el requisito principal radica simplemente en que la pepa se conserve tan húmeda como sea posible, concretamente alrededor de 5-7% de humedad. El proceso solo puede realizarse de manera eficiente cuando: a) El proceso de reducción de humedad no se lleva a cabo demasiado rápido. b) Se previene la deshidratación de la superficie del cotiledón.

Cambios químicos, es evidente la complejidad química del desarrollo del sabor en el chocolate cuando se estiman los numerosos parámetros que intervienen en su formación, más aún considerando que incluso hoy en día esta característica envidiable no ha sido reproducida por los químicos especialistas del sabor.

Fermentación, durante esta fase de curado la pulpa mucilaginosa que rodea a las pepas sufre la fermentación etanólica, acética y láctica, el ácido y calor generados matan a las semillas alterando las membranas celulares y facilitando, con notable hinchamiento de la pepa, el movimiento de enzimas y sustrato, aunque las reacciones entre éstos no están aclaradas del todo. La presencia y concentración de precursores saborizantes y colorantes dependen de mecanismos enzimáticos, como

la hidrólisis de compuestos polifenólicos por las glicosidasas, la sacarosa es hidrolizada por la invertasa a glucosa y fructosa. Los azúcares son importantes en el establecimiento de los azúcares reductores para la interacción con compuestos amínicos en las reacciones carbonil-amina, Beckett (1988).

Secado, durante la fase de secado tienen lugar reacciones de oxidación de polifenoles catalizadas por la enzima polifenoloxidasas, las reacciones enzimáticas se relacionan con el desarrollo del color pardo característico del chocolate. El calor excesivo y la rapidez de desecación pueden resultar inapropiados para la pérdida adecuada de ácidos volátiles como el acético, lo cual es perjudicial para la calidad, Beckett (1988).

Tostado, el estudio del efecto de los aminoácidos libres, importantes precursores del aroma, y el azúcar durante el tostado de las pepas de cacao, a partir de algunos grupos que fueron separados, reportó que todos fueron parcialmente destruidos en diferentes razones y que cerca del 50% de los ácidos libres de la pepa original permanecían en la pepa tostada. Luego se demostró que los azúcares reductores son capaces de degradar a los aminoácidos y existe una destrucción casi completa de los azúcares reductores en el tostado, Minifie (1980).

MÉTODO

El estudio fue de tipo cuantitativo y tuvo alcance experimental, parte de 4 series de pruebas planificadas con enfoque científico. Se seleccionó el diseño factorial para investigar todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada réplica del experimento.

Se contó con una máquina de tostado de fabricación local con una capacidad

garantizada de 50 kilogramos, provista de un cilindro rotatorio impulsado por un sistema de poleas y un motor trifásico, el calentamiento se realizó por medio de quemadores a gas controlados por un sistema automático. Se emplearon además todas las máquinas necesarias para la fabricación del licor de cacao, mantequilla de cacao y chocolate, como la máquina de limpieza y descascarillado, el molino de rodillos, la mezcladora, la conchadora, la prensa horizontal para extracción de mantequilla de cacao, un viscosímetro Brookfield y equipos para análisis fisicoquímico.

Durante la investigación, el productor y el investigador estuvieron capacitados para optimizar el uso de su maquinaria. Se determinaron los rangos de experimentación de las variables consideradas útiles e importantes y la cantidad, condición y forma de obtener la muestra para que sea representativa de un lote determinado.

Asimismo, se realizó un análisis para tostados en condiciones normales o habituales, con las que se lleva a cabo el proceso de tostado en la fábrica de chocolates, esto permitió formarse una idea con base en datos analíticos acerca de los cambios que se producen en la pepa de cacao durante el proceso de tostado y su relación con las variables independientes del proceso, como el tiempo y la temperatura de tostado, la carga o volumen del lote en el tostador, la velocidad de rotación del tambor y el calentamiento de éste antes de cargar el lote, las características y el tipo o variedad de materia prima alimentada al tostador.

Los análisis preliminares fueron útiles para la validación y elección de las variables o factores respuesta, los métodos utilizados en laboratorio en función a su

reproductibilidad, y para calibrar el sistema de investigación que se utilizó durante el trabajo experimental. Entendiéndose por sistema de investigación a todo el ensamblaje de instrumentos y aparatos de investigación más los insumos y materiales usados.

Una vez calibrados los componentes del sistema de investigación y determinadas las variables significativas aplicables al control del proceso y sus rangos de operabilidad, se procedió a la programación de 4 series de pruebas, para las cuales se recurrió al diseño experimental, adoptando un abordaje estadístico.

Algunos de estos experimentos se convirtieron en las pruebas finales del trabajo de investigación, pruebas diseñadas sobre la marcha en función a los resultados obtenidos en las pruebas de rutina, dirigidas a comprobar resultados o a llegar a otros que condujeron a conclusiones importantes y determinantes para el proceso.

Desarrollo experimental, identificación de variables y resultados

El estudio contó con 4 fases de pruebas, 1 preliminar y 3 fases de pruebas de rutina, en cada una de las fases se implementaron los siguientes pasos: a) factores para analizarse b) diseño experimental, c) discusión de resultados, d) variables respuesta y, e) análisis factorial.

Adicionalmente, se profundizó en el estudio de: a) capa o película superficial en el cotiledón de la pepa de cacao, b) desacidificación, c) recuperación de la humedad, d) verificación, e) fogueo inicial y reducción en el tiempo de proceso, f) duplicados, g) viscosidad y, h) mantequilla de cacao.

Factores para analizar en pruebas preliminares

Se prestó especial atención a diferentes variables consideradas importantes por su influencia en el proceso, como temperaturas de tostado, velocidad de rotación y cantidad de carga en el tostador, además del tipo de materia prima aprovechando la disposición de diferentes variedades de cacao.

Las respuestas o variables dependientes seleccionadas para esta serie de pruebas preliminares fueron: a) propiedades organolépticas, b) tiempo de tostado, c) contenido de humedad, d) acidez, e) azúcares reductores, proteínas, f) deshidratación de la superficie del cotiledón y, g) separación de la cascarilla.

Se realizaron análisis cruzados de tiempo vs. humedad-temperatura, y se midió la varianza.

Por su parte, el análisis de la desacidificación tomó pruebas de la acidez de cacao en condiciones habituales y las comparó con las pruebas desarrolladas, asimismo se evaluó la acidez fija y la acidez volátil. En el caso del estudio de la humedad se estudió su variación en el tiempo, tanto en el caso de la pepa cruda como en la tostada, así como antes y después de ser expuesta a condiciones del medio ambiente. Paralelamente se estudiaron las variaciones de la pepa tostada vs descascarillada. Estos mismos análisis comparativos se realizaron con el licor de cacao. Asimismo, se estudió la viscosidad Vs temperatura. Finalizadas las series de prueba se realizó el análisis factorial para comprobar todas las posibles variaciones y la validez de resultados.

Para validar los resultados obtenidos por el experimento se empleó el análisis de varianza, aplicando la siguiente fórmula:

$$(1) \quad SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$(2) \quad SS_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

donde a es el número de niveles, n el número de réplicas y $N = n \cdot a$ el número total de observaciones. La suma de cuadrados del error se obtuvo por sustracción,

$$(3) \quad SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$$

RESULTADOS

Gracias a las pruebas de investigación acerca del tostado del cacao, se conocen las respuestas para diversos niveles inferiores y superiores de los factores con los que se experimenta a lo largo de las diferentes series de pruebas, resulta de interés entonces deducir la respuesta arrojada por el sistema para valores intermedios comprendidos en el intervalo entre los niveles de cada factor cuantitativo, por ejemplo, a partir del nivel inferior 1:30h y superior 2:10h, se puede calcular el contenido de humedad residual para 1:40, 1:50 o 2:00 horas de tostado, por tanto es importante el desarrollo de ecuaciones de interpolación para la variable respuesta en el experimento; estas ecuaciones son modelos empíricos del proceso en estudio.

Diseño factorial 2³

En el análisis factorial 2³ por ejemplo, es posible obtener una ecuación para la humedad en función de la temperatura de secado, la temperatura de tostado y la velocidad de rotación del cilindro, en base a los resultados y el bajo porcentaje de contribución de la velocidad, se establece el nivel inferior de 38rpm como la velocidad de rotación adecuada para el sistema. En este punto de la investigación se considera práctico encontrar una ecuación en función de las temperaturas y del tiempo transcurrido en el proceso de tostado. Para tal fin se emplean tostados experimentales de diferentes series de pruebas, de acuerdo con criterios de selección en función a los niveles determinados para cada factor.

Para la temperatura de secado se escogen los niveles 305 y 325°F por ser valores con los que se han obtenido mejores resultados; las temperaturas de tostado experimentales de 240, 255, 265, 275, 285 y 305°F se dividen en dos grupos a partir del límite de 265°F; y para el tiempo de tostado se elige un intervalo relativamente corto entre 2:00 y 2:20

horas al finalizar el proceso para que el cambio de temperaturas de una fase a otra se lleve a cabo efectivamente en todas las pruebas.

El diseño experimental 2^3 de acuerdo con las pruebas seleccionadas y los resultados de humedad residual se detallan a continuación.

Tabla 1. $H=f\{T_s, T_t, t\}$ Diseño Experimental

Corrida	A	B	C	Combinación de tratamientos	Humedad (%)	Prueba
1	-	-	-	(I)	2.7	16
2	+	-	-	a	2.4	12
3	-	+	-	b	1.7	19
4	+	+	-	ab	1.8	10
5	-	-	+	c	2.1	17
6	+	-	+	ac	2.1	6
7	-	+	+	bc	1.1	20
8	+	+	+	abc	1.9	7

En el caso de la prueba 12 el valor de humedad se extrapoló debido a que solo tiene una duración de 1:49 horas. Se encontró que el efecto principal A y las interacciones CB y ABC son poco significativos al aportar bajos porcentajes de contribución. Es comprensible que el efecto de la temperatura de secado sea poco significativo porque ambos niveles de este factor son próximos y adecuados para

un tostado favorable, en cambio la temperatura de tostado y el tiempo tienen mayor incidencia.

El incremento en el tiempo de tostado y una temperatura de fase de tostado elevada favorecen una pérdida de humedad efectiva. El modelo matemático para calcular el contenido de humedad residual en la pepa en función a los tres factores es:

$$(4) \quad H = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3$$

Donde x_1 x_2 x_3 son variables codificadas que representan la temperatura de secado, la temperatura de tostado y el tiempo total de proceso respectivamente, x_1 x_2 y x_1 x_3 son interacciones significativas a diferencia de x_2 x_3 y x_1 x_2 x_3 , por lo que estas últimas no se toman en cuenta en la ecuación 4, las letras β corresponden a los coeficientes de regresión. Las variables codificadas oscilan entre -1 y +1, las relaciones con las variables naturales son:

$$(5) \quad x_1 = \frac{T_{\text{sec}} - (T_{\text{sec}_{\text{inf}}} + T_{\text{sec}_{\text{sup}}}) / 2}{(T_{\text{sec}_{\text{sup}}} - T_{\text{sec}_{\text{inf}}}) / 2}$$

$$(5-1) \quad x_1 = \frac{T_{\text{sec}} - (305 + 325) / 2}{(325 - 305) / 2}$$

Del mismo modo,

$$(5-2) \quad x_2 = \frac{T_{\text{tostado}} - 272.5}{32.5}$$

$$(5-3) \quad x_3 = \frac{\text{tiempo} - 2:10}{0:10}$$

Así por ejemplo, si el tiempo se encuentra en el nivel superior ($t=2:20\text{h}$), entonces $x_3 = +1$; o en el nivel inferior ($t=2:00\text{h}$) $x_3 = -1$. En la ecuación 4 la intersección es el promedio de todas las observaciones y los coeficientes β 's son la mitad del efecto estimado de los factores respectivos.

$$(6) \quad H = 1.975 + \left(\frac{0.15}{2}\right)x_1 - \left(\frac{0.70}{2}\right)x_2 - \left(\frac{0.35}{2}\right)x_3 + \left(\frac{0.30}{2}\right)x_1x_2 + \left(\frac{0.25}{2}\right)x_1x_3$$

El gráfico 1 de probabilidad normal de los valores residuales, fue calculado a partir de la diferencia entre los valores leídos de gráficos y los valores estimados, el resultado es satisfactorio, por lo que valida las conclusiones.

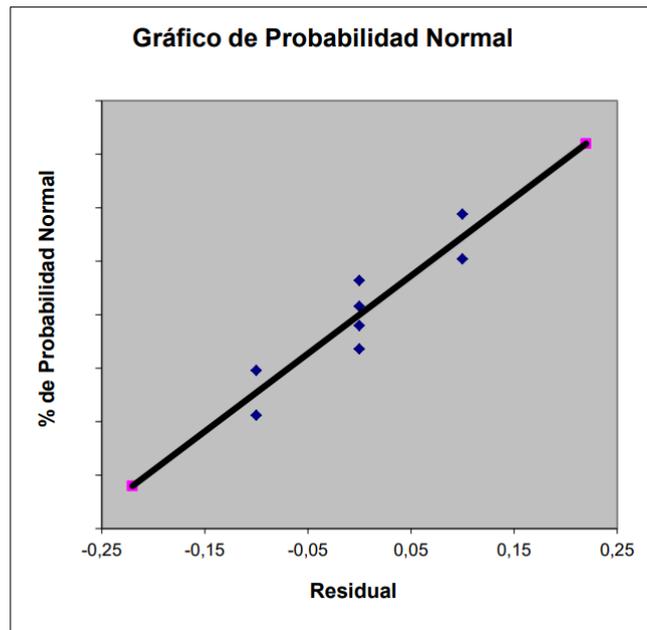


Gráfico 1. Probabilidad normal $H=f\{T_s, T_t, t\}$. Residuales

Así, reemplazando las variables naturales en las ecuaciones (5-1), (5-2), y (5-3) para encontrar las variables codificadas dentro de los límites de interés,

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de secado} &= 305\text{-}325^{\circ}\text{F} \\ \text{Temperatura de tostado} &= 240\text{-}305^{\circ}\text{F} \\ \text{Tiempo de tostado} &= 2:00\text{-}2:20\text{h} \end{aligned}$$

Se presenta el modelo matemático que describe satisfactoriamente el proceso:

$$(6) \quad H = 1.975 + 0.075x_1 - 0.35x_2 - 0.175x_3 + 0.15x_1x_2 + 0.125x_1x_3$$

en función a las variables naturales,

$$(7) \quad H = 95.985 - 0.282 \cdot T_s - 0.156 \cdot T_T - 596.016 \cdot t + 4.615e^{-4} \cdot T_s \cdot T_T + 1.812 \cdot T_s \cdot t$$

Diseño factorial 2^2

Se establece la temperatura de secado más adecuada para el proceso en el intervalo de 305 a 325°F y dentro de éste es posible determinar una ecuación para el contenido de humedad residual en función de la temperatura de tostado y del tiempo de proceso. El diseño experimental, empleando las pruebas experimentales con las temperaturas de secado indicadas, es:

Tabla 2. $H=f\{Tt,t\}$ Diseño experimental

Corrida	A	B	Combinación de tratamientos	Humedad I (%)	Humedad II (%)	Pruebas
1	-	-	(l)	2.7	2.4	16-12
2	+	-	a	1.7	1.8	19-10
3	-	+	b	2.1	2.1	17-6
4	+	+	ab	1.1	1.9	20-7

El análisis de varianza muestra que ambos factores principales son significativos y el efecto de la interacción es menor. (Tabla 3).

Tabla 3. $H=f\{Tt,t\}$ Análisis de varianza

Término	Efecto estimado	Suma de cuadrados	Grados De libertad	Cuadrado promedio	Fo	Valor P
A	-0.70	0.980	1	0.980	10.59	<0.05
B	-0.35	0.245	1	0.245	2.649	<0.25
AB	0.10	0.020	1	0.020	0.216	
Error		0.370	4	0.0925		
Total		1.615	7			

En la ecuación resultante el término correspondiente a la interacción puede o no tomarse en cuenta porque el efecto no es significativo, tal como puede apreciarse al comparar los gráficos de probabilidad normal de los valores residuales, en ambos casos los puntos se ajustan a una línea recta.

Las ecuaciones para relacionar las variables naturales con las codificadas y el modelo matemático para predecir el contenido de humedad residual dentro de los límites acordados en función a la temperatura de tostado (240-305°F), y al tiempo de proceso (2:00-2:20h), cuando se emplea una temperatura de secado dentro del intervalo 305-325°F, son:

$$(5-4) \quad x_1 = \frac{T_{\text{tostado}} - 272.5}{32.5}$$

$$(5-5) \quad x_2 = \frac{\text{tiempo} - 2:10}{0:10}$$

así,

$$(8) \quad H = 1.975 - 0.35x_1 - 0.175x_2 + 0.05x_1x_2$$

en función a las variables naturales:

$$(9) \quad H = 12.786 - 0.031 \cdot T_T - 86.13 \cdot t + 0.223 \cdot T_T \cdot t$$

En vista de que se determina el intervalo 305-325°F como el más apropiado para la temperatura de secado, ahora será práctico desarrollar un modelo matemático para la humedad residual en función a la temperatura de secado y al tiempo de proceso $H=f\{T_s,t\}$, pero esta vez con un intervalo de tiempo más amplio. Prácticamente todas las pruebas seleccionadas tienen una temperatura uniforme durante el tiempo de proceso considerado, ya sea en el nivel alto o bajo, por lo que la temperatura de secado será igual a la temperatura de tostado, fundiéndose en una temperatura general de proceso y denominándose simplemente temperatura. Así entonces la humedad será función de la temperatura y el tiempo $H=f\{T,t\}$. (Tabla 4).

Tabla 4. $H=f\{T,t\}$ Factores y niveles

	Factor	Nivel	
		Bajo	Alto
A	temperatura de proceso (°F)	305	325
B	tiempo de proceso (h)	1:30	2:10

El diseño experimental está conformado de manera que la temperatura de tostado sea la misma que la temperatura de secado, excepto en la prueba 12, en la que se emplea una temperatura de tostado de solo 240°F, aunque con una velocidad de rotación mayor (49rpm), y se alcanza un contenido de humedad similar al que se obtiene en la prueba 7, con una temperatura constante de 325°F durante las 2:10 horas de proceso, y en este diseño la prueba 12 se combina con la prueba 7. (Tabla 5).

Tabla 5. $H=f\{T,t\}$ Diseño experimental

Corrida	A	B	Combinación de tratamientos	Humedad I (%)	Humedad II (%)	Pruebas
1	-	-	(l)	3.9	3.5	16-17
2	+	-	a	2.8	3.1	6-10
3	-	+	b	1.4	1.5	19-20
4	+	+	ab	2.3	2.2	7-12

Del análisis de varianza se rescata que el efecto de la temperatura no es significativo, como era de esperarse, pero sí lo son los efectos del tiempo y de la interacción entre temperatura y tiempo.

Asimismo, tanto para 305°F como para 325°F, se obtiene una humedad residual menor a medida que se incrementa el tiempo de proceso.

La temperatura de secado interacciona con el tiempo debido a que esta fase es la que consume precisamente la mayor parte del tiempo total de proceso, hasta fundirse con la temperatura de tostado en una sola temperatura de proceso como ocurre en las pruebas 19 y 20. Lo mismo sucede en las pruebas consideradas ahora, ya que la temperatura fue constante durante los tiempos contemplados en este diseño. Los valores de humedad residual en función a una temperatura de proceso de entre 305 y 325°F, y un tiempo de proceso comprendido en el intervalo de 1:30 a 2:10 horas, se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$(5-6) \quad x_1 = \frac{\text{Temperatura} - 315}{10}$$

$$(5-7) \text{ entonces, } x_2 = \frac{\text{tiempo} - 1 : 50}{0 : 20}$$

$$(10) \quad H = 2.59 - 0.74x_2 + 0.39x_1x_2$$

en función a las variables naturales:

$$(11) \quad H = 74.1807 - 0.21436 \cdot T - 937.052 \cdot t + 2.8058 \cdot T \cdot t$$

En el gráfico 2 de probabilidad normal los valores residuales se ajustan bastante bien a una línea recta, proporcionando solidez a las conclusiones y ecuaciones desplegadas.

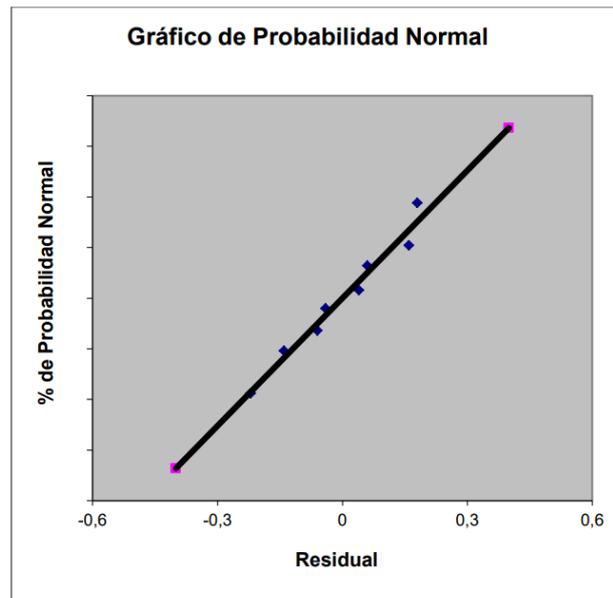


Gráfico 2. $H=f\{T,t\}$ Probabilidad normal. Residuales

Diseño factorial 3¹

El intervalo de temperatura 305-325°F es adecuado para la fase de secado y los mejores resultados se obtienen con una fase de tostado a 305°F, convirtiéndose ésta en una temperatura conveniente para todo el proceso de tostado del cacao. Entonces, será útil contar con un modelo matemático que permita predecir los valores de humedad residual en la pepa para un tiempo de tostado dado, cuando se emplea una temperatura de 305°F. Para ello se seleccionan las pruebas en las que se experimenta con 305°F aprovechando la cantidad para aumentar los niveles del diseño a tres (I=tiempo de proceso 1:20, II= tiempo de proceso 1:50 y III= tiempo de proceso 2:20).

La prueba 7 con una temperatura de 325°F, que se diferencia de la temperatura de interés en esta sección en solo 20°F, se utiliza para completar las parejas de pruebas del diseño experimental. (Tabla 6).

Tabla 6. $H=f\{t\}$ Diseño experimental

Tiempo de Proceso (h)	Observaciones		Total	Promedio	Pruebas
	1	2			
1:20	4.6	3.8	8.4	4.20	7-16
1:50	2.8	2.1	4.9	2.45	17-19
2:10	1.1	1.1	2.2	1.10	20-21
Total			15.5	2.58	

El análisis de varianza revela que el efecto del tiempo afecta significativamente el contenido de humedad residual. El modelo de regresión que describe mejor el proceso es un polinomio cuadrado.

$$(12) \quad H = 460.8 t^2 - 144.8 t + 10.822$$

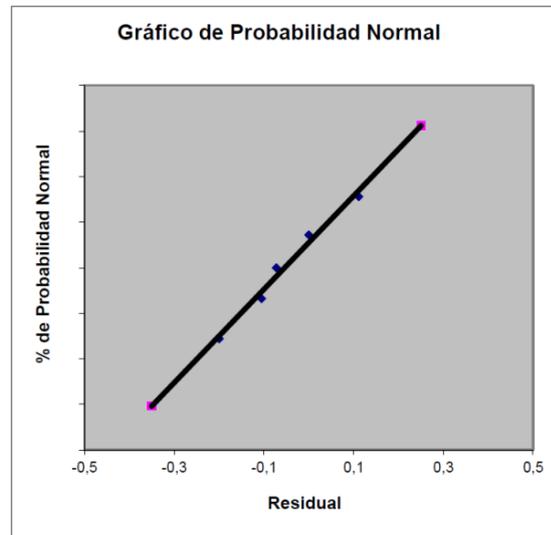


Gráfico 3. $H=f\{t\}$ Probabilidad normal de residuales (ecuación 12)

La ecuación 12 se obtiene a partir de un gráfico de solo tres puntos, aunque cada uno de ellos corresponde al promedio de valores de dos pruebas diferentes. Otra manera de encontrar una ecuación que describa el proceso es a partir de un gráfico con mayor cantidad de puntos que corresponden únicamente a pruebas con una temperatura de 305°F, aunque esta vez no se dispone de pares de valores para calcular el promedio, sino de un solo valor medido de humedad residual para cada valor de tiempo.

La ecuación resultante es otro polinomio cuadrado,

$$(13) \quad H = 768 t^2 - 196.05 t + 12.911$$

Los valores de humedad calculados con esta ecuación para diferentes tiempos de tostado se comparan nuevamente con valores medidos en diversas pruebas experimentales, el gráfico 4 de residuales muestra que el modelo también es satisfactorio.

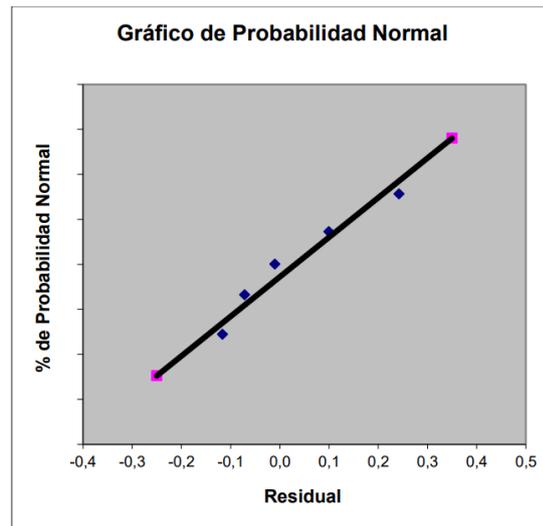


Gráfico 4. $H=f\{t\}$ Probabilidad normal de residuales (ecuación 13)

Comparando los gráficos 3 y 4 se observa que los residuales que mejor se distribuyen sobre una línea recta corresponden al primero, y la ecuación 12 está determinada con base a pares de datos y no a datos únicos.

Análisis

El licor de cacao obtenido de este modo tiene menor contenido de acidez, mayor desarrollo de sabor y aroma, y mucha menor viscosidad, lo que le otorga importantes ventajas. El bajo contenido de humedad facilita el molido del cotiledón, el reducido contenido de acidez permite acortar la etapa de desacidización posterior al molido, la menor viscosidad ahorra tiempo y esfuerzo en la elaboración de manteca de cacao, mejorando además la eficiencia del proceso de extracción. La viscosidad del producto incluso permitirá reducir la cantidad de manteca de cacao adicionada a las diferentes recetas de chocolate, pues esta se usa para alcanzar la consistencia deseada en la mezcla de ingredientes del chocolate.

La temperatura de tostado es fundamental para la obtención de mejoras

en la calidad del producto derivado, así, el tostado a una temperatura constante de 305°F puede emplearse para obtener licor de cacao de alta calidad y bajo contenido de humedad, tanto para la preparación de chocolate como para manteca de cacao de primera. Empleando fases de tostado a temperaturas más elevadas, se pueden obtener licores con sabores más intensos reduciendo el tiempo de proceso. Si bien el estudio consideró la temperatura como variable imprescindible a tomar en cuenta para el proceso de tostado, se recomienda desarrollar estudios posteriores considerando también la presión y el tamaño de la pepa de cacao.

El análisis de acidez y azúcares reductores en la pepa arroja resultados que no muestran un sentido de variación definido, por lo que es inviable relacionarlos provechosamente con el avance del tostado debido a que para estos parámetros las muestras no son representativas del lote procesado. Sin embargo, el contenido de acidez resulta de utilidad cuando el lote se homogeniza en una masa de licor de cacao uniforme en la etapa posterior de molido.

El incremento de 38 a 49rpm puede ser de utilidad cuando se dispone de poco tiempo para tostar la pepa almacenada, por ejemplo, cuando existe riesgo de deterioro o crece inesperadamente la demanda del producto. Aumentar la velocidad hasta 63rpm aumenta las pérdidas de materia prima y el riesgo de contaminación.

Aplicando las condiciones de operación habituales en las pruebas preliminares, secado a 360°F y tostado a 223°F, la pérdida de humedad en la pepa es notoria en la primera parte del proceso o fase de secado, convirtiéndose en poco significativa durante la segunda parte o fase de tostado; cuando se intenta deshidratar más el cacao alargando la fase de tostado se percibe con claridad que la pepa comienza a quemarse en la superficie.

La formación de la capa superficial y su efecto se ponen en evidencia al medir el contenido de humedad residual en muestras de pepa de cacao tostado en un mismo lote, tanto enteras como troceadas, y observar diferencias apreciables entre estas cuando se trabaja con cacao tostado a temperatura elevada y no así en el cacao tratado a temperaturas más bajas.

Se logra evitar o al menos reducir en gran medida la formación de la capa superficial, aplicando una fase de secado suave a 280-325°F, que conserva porosa la superficie del cotiledón y propicia que la pepa pierda humedad de manera efectiva y significativa a lo largo de todo el proceso, aunque para ello sea necesario incrementar el tiempo de tostado.

La fase de secado a 340 y 360°F es inadecuada para el proceso por favorecer el desarrollo de la capa superficial y restringir la temperatura de la fase de tostado a un máximo de 223°F para evitar que la pepa se queme. El calentamiento de la materia

prima a baja temperatura en la fase de secado previene la formación de la capa superficial indeseable en el cotiledón, por lo que ésta es prácticamente nula a 280°F, poco notoria y en bajo porcentaje a 305 y 325°F, y finalmente muy notoria y en proporción considerable a 340 y 360°F.

Una fase de secado a 280 o 325°F, temperaturas menores a la habitual de 360°F, permite que la superficie del cotiledón permanezca porosa y contribuye a obtener bajos contenidos de humedad, con una pérdida de humedad efectiva incluso durante la fase final o fase de tostado.

Es posible disminuir el contenido de humedad residual en la pepa por debajo del 3%, trabajando con temperaturas de secado inferiores a 360°F y temperaturas de tostado superiores a 223°F, que son las que se emplean habitualmente en la planta; 141 al mismo tiempo y sin quemar la pepa, es factible alcanzar valores de temperatura interna superiores al límite de 223°F establecido para tostados habituales, la desventaja radica en un incremento significativo en el tiempo de proceso.

Tomando como referencia el calentamiento a 340°F, el tiempo empleado en la fase de secado se incrementa en un 25% cuando se aplican temperaturas de 305 y 325°F, y aumenta en un 85% con una temperatura de 280°F.

En función a los resultados obtenidos en la primera y segunda series de pruebas de rutina, se adopta el intervalo de temperatura de 305-325°F para la fase de secado dentro del proceso de tostado de cacao en la fábrica.

El incremento de temperatura en la fase de tostado es conveniente para el proceso porque proporciona continuidad a la pérdida de humedad en la pepa, permite

alcanzar una temperatura interna adecuada para un mejor desarrollo de las características organolépticas y reduce el tiempo empleado en esta fase.

El tostado de la pepa de cacao en el que se aplica una temperatura externa de 305°F proporciona continuidad a la pérdida de humedad de tal modo que es posible sobrepasar los 290°F de temperatura interna y obtener un producto con un contenido de humedad del orden del 1% sin quemar la pepa.

La combinación de una fase de secado a temperatura moderada (305-325°F) y una fase de tostado a temperatura elevada (305- 325-350°F) respecto a las que se aplican habitualmente (360°F en el secado y 223°F en el tostado), deriva en una reducción en el contenido de humedad residual y mejora la disponibilidad de la pepa de cacao para deshidratarse uniformemente mientras se lleva a cabo el desarrollo adecuado de propiedades organolépticas.

Tratamientos similares como los aplicados en las pruebas 7, 16, 17, 19, 20 y 21 ($T_{\text{secado}}=305-325^{\circ}\text{F}$; $T_{\text{tostado}}=265-255-275-285-305^{\circ}\text{F}$) proporcionan resultados semejantes, independientemente de diferencias en algunas características propias de la materia prima, como por ejemplo el contenido de humedad inicial en la pepa.

Las nuevas condiciones de operación determinadas a lo largo de la investigación se pueden aplicar satisfactoriamente en materia prima de distinta variedad y lugar de procedencia.

La proporción en la que el cacao incrementa humedad desde que sale del tostador hasta que termina el proceso de descascarillado, no es suficiente como para adoptar un límite en el tostado en función al

contenido de humedad, además la humedad que pierde la pepa arrastra consigo compuestos volátiles perjudiciales para el desarrollo de sabor y aroma, como el ácido acético y otros ácidos grasos volátiles, los cuales en la medida en la que se desprenden de la pepa, se eliminan permanentemente de la composición del producto.

Los tratamientos experimentales de secado-tostado a 305-305°F y 325-350°F motivan una pérdida de humedad en la pepa que arrastra consigo compuestos ácidos volátiles en mayor cantidad que la conseguida en tostados habituales, por ello el contenido ácido, tanto fijo como volátil, es menor en el licor de cacao obtenido mediante las nuevas condiciones de operación aplicadas en el proceso de tostado.

Cuando se incrementa la temperatura por encima de los 305°F en la segunda fase del proceso de tostado, la pepa adquiere un sabor más fuerte que se mantiene hasta el final en el chocolate, así el fabricante puede elegir si mantiene la temperatura a 305°F durante la fase de tostado para producir licor de cacao con un sabor suave, o bien aumenta hasta 325- 350°F para obtener sabores más fuertes en el producto.

De acuerdo con el tratamiento aplicado, el contenido de humedad residual en la pepa puede regularse en función al tiempo de tostado, así por ejemplo se obtiene pepa de cacao con una humedad del 2% en 1:57h con un tratamiento a 305-305°F y en 1:30h a 305-325-350°F, obteniendo sabores diferentes y satisfactorios, mientras que con el tratamiento habitual de 360-223°F no es posible alcanzar este contenido de humedad en la pepa.

Un fognazo al comenzar el proceso de tostado, consistente en el calentamiento del

cilindro tostador cargado a una temperatura de 400°F, con una duración de 5, 10 y 17 minutos combinado con incrementos relativamente grandes de temperatura en la fase de tostado por encima de los 305°F, por ejemplo, hasta 370 o 390°F resulta improductivo porque deriva en el desarrollo de sabor y aroma a quemado en la pepa. Asimismo, el fognazo inicial de no más de cinco minutos de duración no origina el desarrollo de sabor a quemado, aunque tampoco es favorable para la reducción en el tiempo total de tostado ni mejora la eficiencia en la deshidratación de la pepa.

El contenido de humedad es una característica de predominante influencia sobre la viscosidad del licor de cacao, con un efecto directamente proporcional a la resistencia del fluido al movimiento. Asimismo, el licor de cacao obtenido a partir de pepa tostada con bajo contenido de humedad es menos viscoso que aquel obtenido de cacao tostado en condiciones habituales; al presentar menor resistencia al movimiento, facilita su manipulación y transporte. Además, requiere de menor cantidad de mantequilla de cacao extra para lograr la consistencia deseada en la preparación del chocolate. Por otra parte, la viscosidad del licor disminuye cuando se somete el fluido a la acción de fuerzas de cizalladura durante el mezclado combinado con calentamiento, el licor menos húmedo y por tanto menos viscoso, se calienta con mayor facilidad y supera los 70°F, temperatura que el licor más húmedo no puede alcanzar bajo las mismas condiciones de calentamiento y mezclado. Gracias a estas características se agilizan los procesos de carga de la prensa hidráulica y el prensado para la extracción de mantequilla de cacao. Finalmente, el contenido de

humedad en el licor a partir del cual se realiza la extracción de mantequilla de cacao es determinante para la eficiencia de la operación, se obtiene el rendimiento máximo de 44% cuando se opera con licor de cacao con 1% de humedad, a diferencia del 41% conseguido a partir del licor con 3% de humedad residual.

CONCLUSIONES

Mediante un estudio experimental validado por diseños factoriales en una fábrica de chocolates, se obtuvo un modelo de control de los fenómenos fisicoquímicos que definen el tostado de la pepa de cacao. En este caso se considera la temperatura como una variable imprescindible a tomar en cuenta para el proceso de tostado, permitiendo el correcto manejo de la misma generar mejoras considerables en la calidad del producto derivado; gracias al conocimiento adquirido se considera que posteriores estudios deberán enfocarse en analizar la presión de vacío, contando con un equipo tostador diseñado para trabajar en condiciones herméticas y una disposición para la liberación de los compuestos volátiles generados; otra variable a tener en cuenta es el tamaño de la pepa de cacao, la separación en diferentes tamaños permitirá una mejor distribución del calor en el interior del tostador y un tostado más uniforme en la pepa.

La aplicación del modelo propuesto permitirá elevar la calidad de los productos derivados del cacao en fábricas de chocolate que tengan tecnología similar a la usada en esta investigación. Tras la validación experimental, se concluye que la aplicación del modelo permitirá: facilitar el molido dada la reducción de la humedad residual; acortar la etapa de

desacidificación debido a la reducción del contenido de acidez del licor de cacao; reducir la cantidad de mantequilla cacao para la producción de chocolate gracias a la reducción de su viscosidad; y elevar la calidad del producto derivado gracias a las ventajas previamente listadas.

REFERENCIAS

- Beckett, S.T. (1988). *Fabricación y Utilización Industrial del Chocolate*. Editorial ACRIBIA S.A. Zaragoza España
- Callebaut (1992) "All About Chocolate" Revista M/97, Publicado por Callebaut, Wieze, Bélgica
- Carbajal, M. (1985) "Obtención del Licor de Cacao Base", Tesis de grado, Facultad de Tecnología, Universidad de San Francisco Xavier, Sucre, Bolivia
- Gianola, C. (1983) *La Industria del Chocolate, Bombones, Caramelos y Confitería*. Editorial Paraninfo S.A. Madrid, España
- Healy, K. (2001). *Llamas, weavings and organic chocolate: multicultural grassroots development in the Andes and Amazon of Bolivia*. University of Notre Dame Press
- Meiners, A; Kreiten, K; JOIKE, H. (1984). *Silesia Confiserie Manual N° 3. The NEW Handbook for the Confectionery Industry. Volume 2. Silesia - Essenzenfabrik Gerhard Hanke K.G., abt. Fachbucherei. Neuss 21 (Norf). W. Germany*
- Minifie, B.W. (1980). *Chocolate, Cocoa & Confectionery: Science & Technology*. AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut. Segunda Edición
- Varas Acuña, C. A. (2010). *Aplicación de metodología DMAIC para la mejora de procesos y reducción de pérdidas en las etapas de fabricación de chocolate*