

ARTÍCULO ORIGINAL

**Diseño de un fermentador
cilíndrico automatizado para
la fermentación de cacao
criollo piurano****Design of an automated
cylindrical fermenter to the
fermentation of Piura native
cocoa**

Luis Guzmán Farfán¹, Miguel Castro Sánchez², Gastón Cruz Alcedo² y Arturo Arbulú Zuazo^{3*}

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Piura, Piura, Perú

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura, Piura, Perú

³ Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica Agroindustrial Piura (CITE Agroindustrial Piura), Piura, Perú

* Autor de correspondencia: arturo.arbulu@citeagropiura.org

Resumen

Durante mucho tiempo se ha venido investigando sobre las distintas formas de fermentar cacao de manera óptima. Los fermentadores se diferencian por su forma y tamaño, normalmente contruidos de madera para garantizar un cacao de buena calidad, con buen olor, sabor, color y apariencia. Los tipos de fermentadores más recomendables son: el cajón sencillo, cajón tipo canoa, cajones en escalera y bandejas; todos ellos con hoyitos en el fondo para que salga el mucílago. En todos los tipos de fermentadores, cada dos días, se debe uniformizar toda la mezcla y aflojar la masa para tener una buena fermentación. Este proceso se lleva acabo cada día o día y medio de forma artesanal, vaciando los cajones sobre unas mantas para proceder con palanas a voltearlo, ello no solo uniformiza y suelta la masa, sino que también disminuye la temperatura de fermentación y como consecuencia el tiempo de fermentación es mayor. El objetivo de esta investigación fue el diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para el volteo de la masa de cacao. El diseño incluyó sensores de pH y temperatura, con un motor para el volteo automático de la masa cuando se superan los parámetros establecidos de temperatura en el interior. Los resultados evidenciaron un menor tiempo de fermentación, en promedio 90% en 96 horas, y una temperatura que no superó los 50 °C.

Palabras clave: fermentado de cacao, control automático, sensores de temperatura, sensores de pH, cacao criollo piurano, fermentado automático

Abstract

For a long time, research has been done about the different ways of fermenting cocoa optimally. Fermenters differ in shape and size, usually made of wood to guarantee good quality cocoa, with a good smell, taste, color and appearance. The most recommended fermenters are the single drawer, drawer-type canoe, ladder drawers and trays; all with little holes in the bottom to release the mucilage of cocoa. All kinds of fermenters, every two days, the blend must be uniform and the mass loosen up to have a good fermentation. This process is carried out every day or a day and a half in a traditional way, emptying the drawers on some blankets to proceed with levers to turn it, this not only makes the dough uniform and loosens, but also decreases the fermentation temperature and as a consequence the time of fermentation is higher. The aim of this research was the design of an automated cylindrical fermenter to turn the cocoa mass. The design included pH and temperature sensors, with a motor for the automatic turning of the dough when the established temperature parameters inside are exceeded. The results evidenced a shorter fermentation time, an average of 90% in 96 hours, and a temperature that did not exceed 50 °C.

Key words: fermented cocoa, automatic control, temperature sensors, pH sensors, Piura native cocoa, automatic fermentation

Introducción

La fermentación se lleva a cabo en forma tradicional en cajones fermentadores siguiendo recomendaciones, para procesar cada tipo de cacao por zona; tiempos del proceso total y tiempos de remoción, utilizando excesiva mano de obra (Rodríguez-Campos *et al.*, 2012). No se tienen en cuenta, los parámetros claves como la temperatura del grano de cacao, y el seguimiento del pH. Con el registro de estas variables, se pueden determinar los tiempos de fermentación sin alterar las cualidades sensoriales, es decir obtener un mejor grano y una calidad estable, al actuar cuando los parámetros relevantes indiquen que se requiere una remoción y no por un tiempo establecido, sin importar si el año es frío, caluroso, seco, húmedo, etc.

El presente estudio se basa en el diseño y construcción de un prototipo de fermentador de cacao automático que cuente con sensores de temperatura y pH de manera tal, que definan las acciones del equipo para lograr que la fermentación sea uniforme (Copetti, 2012) y el proceso se realice de manera precisa, a fin de lograr que el

cacao alcance sus características organolépticas especiales como mencionan (Rodríguez-Campos *et al.*, 2011; Lefeber *et al.*, 2012).

La mayoría de empresas desarrolla el proceso de fermentación en forma tradicional, lo cual, no permite un adecuado control del proceso, existen variables críticas que deben de monitorearse (pH y Temperatura) durante todo el proceso a fin de obtener un grano de calidad y con el grado de fermentación requerido por nuestros clientes.

En el proceso actual no hay medición de parámetros y sólo se siguen indicaciones a manera de receta, muchas veces el grado de fermentación no es el adecuado por no haber controlado el proceso y no haber realizado la remoción adecuada y oportuna (por las noches no es posible contar con personal para la remoción, dejándose de remover y generando altas temperaturas e incrementándose la temperatura y el pH). Con estas condiciones la calidad se afecta hasta en un 30% de un lote, es decir que los granos salen con defectos, teniendo que venderse como cacao grado 2 a menor precio en el mercado.

En el presente trabajo se presenta el estudio de un fermentador cilíndrico con control de temperatura y pH para la remoción automática del cacao cuando se superen los parámetros establecidos. De esta forma no es necesario sacar el cacao de su contenedor logrando mantener su temperatura y de esta forma disminuir el tiempo de fermentado. Existen estudios de fermentadores cilíndricos de cacao en otros países con otras variedades de cacao y climas distintos como las experiencias en Colombia registradas por (Universidad Técnica de Ambato, 2011; Espinoza, 1998; Villamizar, 2008).

Materiales y métodos

Materiales

Los materiales que se utilizaron en la fabricación del fermentador cilíndrico son: madera tipo pino y el acero inoxidable. Toda lo que está en contacto con el cacao es un tambor de madera, mientras que la parte exterior está forrada por otro tambor de mayor diámetro de planchas de acero inoxidable que reciben mucílago para recogerlo por un extremo. De esta forma se mantiene la limpieza del sitio de fermentación.

Descripción del sistema

En la actualidad, en Perú no se han tenido iniciativas por automatizar el proceso de fermentación del cacao; sin embargo, es posible desarrollar esta innovación debido a que se pueden incorporar componentes de control, tales como medidores de temperatura y pH que a través de una tarjeta de adquisición de datos y un controlador lógico programable (PLC), comanden el accionamiento del mecanismo de remoción y

tenga en cuenta los tiempos del proceso. La tecnología se basa en incorporar un Controlador Lógico que en función a la temperatura y el pH accionen el mecanismo de remoción en forma automática.

A nivel internacional se sabe que en Colombia se ha desarrollado un proyecto denominado "Análisis y diseño de la automatización de un tambor rotativo para el proceso de fermentación del cacao mediante la utilización de módulos analógicos configurables", investigación realizada en el Centro de Investigación para el Fomento del Cacao (CIFCA) por Villamizar (2008), lo cual nos demuestra que ha habido iniciativas por abordar el tema, que sustentan la hipótesis de que es posible controlar el proceso de fermentación de manera automática con dispositivos de tecnología más moderna y asequible a los medios rurales.

Con respecto al control de temperatura y pH existen controladores y medidores de estos parámetros, pero aplicados a otros procesos, en los cuales ha sido posible implementarlos partiendo del conocimiento del proceso y las variables a medir. A nivel de Piura no se cuenta con equipos de registro, ni mecanismos automáticos para sus procesos. Por ello, el control se hace deficiente lo cual, es una desventaja que se traduce en baja de calidad, mermas de producto ofertado, y exceso en costos operativos. El objetivo del fermentador es garantizar que la fermentación del cacao se realizará en rangos definidos de temperatura y pH a lo largo de todo el tiempo necesario para la fermentación.

Las características de la materia prima fueron las de trabajo cotidiano, analizados en la recepción para evitar exceso de granos verdes, sobremaduros, etc. Los parámetros medidos se generan por la fermentación aeróbica (parte expuesta al aire) y anaeróbica del cacao (parte interior, no expuesta al aire). La fermentación correcta potencia la calidad de grano; la fermentación incorrecta hace que el grano pierda su calidad. Un parámetro que indica la calidad de fermentación es el porcentaje de grano color violeta (no fermentado).

El producto derivado del proceso de fermentación y secado para exportación presenta las siguientes características:

Humedad: 7- 8%

Impurezas: menor al 1.0%

Rendimiento de grano: 80 – 83%

Grado de fermentación: 80 – 90 %

Peso prom. De grano: 100 - 120 gramos / 100 granos

Hongos: 0.00 %

Cacao Blanco - Porcelana: 30 – 60%

El flujo del proceso es el siguiente:

- Acopio; realizado por los productores en campo
- Pesaje; el grano llega con alta humedad 25%.
- Fermentado
- Secado bajo sol en mantas
- Secado bajo sombra
- Tamizado
- Pesado
- Envasado
- El control automatizado

No se utiliza registros de parámetros para los procesos tradicionales manuales: fermentado, secado, tamizado, pesaje y envasado.

El Plan Metodológico contempla el estudio del proceso y sus parámetros Temperatura y pH, para lo cual, se tomó datos de los lotes procesados en planta. La tecnología investigada está relacionada con el proceso de fermentación, es decir, tecnología de control de proceso que permite controlar el proceso de manera automática a fin de mejorar la calidad de grano obtenido para la exportación. Esta tecnología tiene como característica la integración de dispositivos sensores con dispositivos de control (PLC) y comandar el accionamiento de un mecanismo de remoción en función a los parámetros de pH y temperatura.

Especificaciones técnicas del fermentador

El fermentador cilíndrico tiene un diámetro de 1.5m y una longitud de 2.4m. Este tambor está reforzado en el centro con un eje de acero inoxidable de 3 pulgadas SCH 40. Ambos extremos están soldados a un eje sólido de 1.5 pulgadas para apoyarse en las chumaceras. El eje del fermentador está ubicado a una altura de 1.2m con respecto al suelo para que la parte más baja del fermentador se ubique a 45 cm del piso. Se utilizó el fermentador para obtener cacao con dos grados de fermentación 40% y 90%.

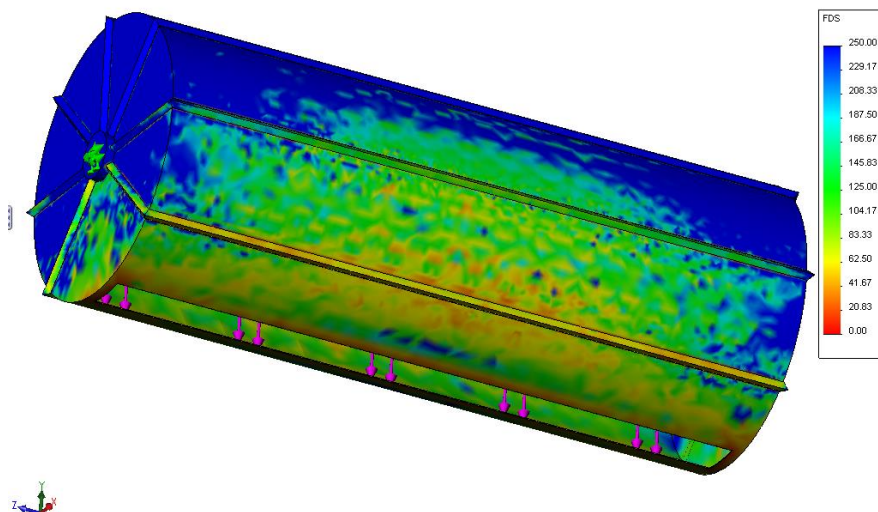
El fermentador formado por un cilindro de madera de pino reforzado con ángulos de acero inoxidable de L2"x1/8" para ofrecer mayor rigidez y resistencia a las cargas debidas al peso del cacao. Cuenta con una puerta de descarga a lo largo de los 2.4m usado también para una buena distribución del cacao dentro del fermentador.

Se realizó un análisis de esfuerzos y deformaciones del fermentador para evaluar su resistencia de las cargas antes de su construcción. La simulación por el método de los elementos finitos se llevó a cabo con el software Solidworks. En la Figura 1 se muestra la distribución del factor de seguridad en el fermentador.

Figura 1

Factor de seguridad del fermentador

Nombre de modelo: secador_cilindro
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.3



Descripción del sistema de control de parámetros

El sistema automatizado para control de un fermentador de cacao consta de seis sensores (tres de temperatura y tres de pH), una unidad de control (PLC – Programador Lógico Computacional), un motor para el giro del cilindro fermentador y un sistema de respaldo de energía eléctrica.

El sensor de temperatura es una resistencia variable con los cambios de temperatura (RTD – Resistance Temperature Dependant), la cual es medida entre sus terminales por el PLC. EL criterio de elección fue el rango de temperatura en el cual opera y la precisión que tienen, así como la longitud de la sonda de medición.

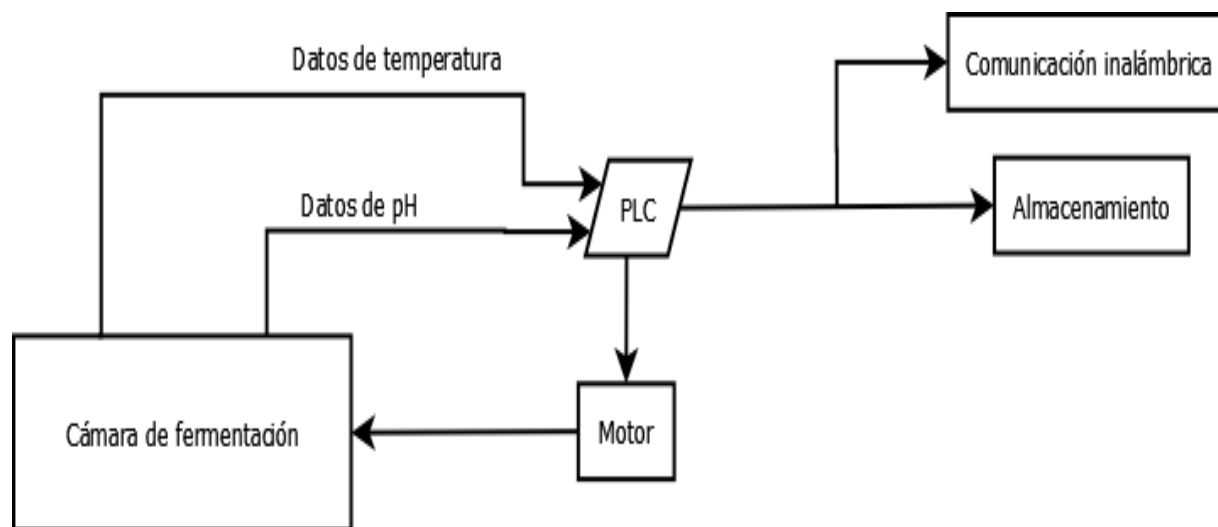
El sensor de pH mide la diferencia de potencial eléctrico que se desarrolla a través de una membrana de vidrio que separa dos soluciones, una de concentración conocida (usualmente ácido clorhídrico saturado con cloruro de plata) y la otra de concentración por conocer, que es la solución a trabajar y medir.

El controlador lógico programable - PLC encargado de recibir las señales de los sensores y proceder con la toma de la decisión correcta. Se debió asegurar contar las suficientes entradas apropiadas para los sensores y salidas para los actuadores, en este caso, el único fue el motor.

A continuación, se muestra un esquema de funcionamiento del PLC dentro del sistema de control de Temperatura y pH del fermentador (Figura 2).

Figura 2

Esquema de funcionamiento del PLC



El motoreductor, encargado de realizar las vueltas a la cámara de fermentación cilíndrica. Para definir el tipo de motor a emplear, se calculó la potencia aproximada de 3 hp para el tamaño del fermentador que se requerirá para el giro del cilindro.

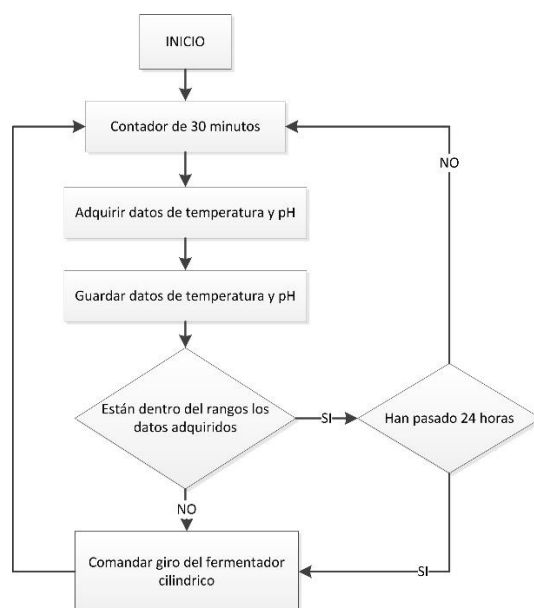
La unidad de respaldo de energía en caso la red de alimentación eléctrica doméstica falle. Para su elección se tomó en cuenta la potencia que era capaz de almacenar, así como el voltaje nominal que entrega, la máxima corriente que lo puede circular y el tiempo que se mantiene encendido

Diagrama de funcionamiento

El sistema automatizado tiene dos modos de funcionamiento trabajando en paralelo: el primero encargado de la remoción diaria, es decir, cada 24 horas gira una vuelta a una velocidad constante (de entre 6 y 10 rpm). El segundo modo de funcionamiento es movimiento por error, y trabaja cada vez que el PLC detecte que los sensores marquen temperaturas y niveles de acidez fuera del rango. El rango de pH trabajado es de 4 a 7, y la temperatura superior a 50 °C (Figura 3).

Figura 3

Diagrama de flujo de la automatización



Resultados

Diseño y construcción del fermentador

Se logró la ejecución de las funciones de remoción programadas y una disminución del tiempo de proceso, respecto a lo acostumbrado; para las remociones comandadas por los sensores, ante una desviación, el punto crítico seleccionado de 50°C no se alcanzó en ningún momento, por lo que, los productores debieron identificar los parámetros límite accionadores durante el proceso (menores), para lograr la mejor calidad posible del cacao o las características requeridas por el cliente, tal como el porcentaje de fermentación, entre otros.

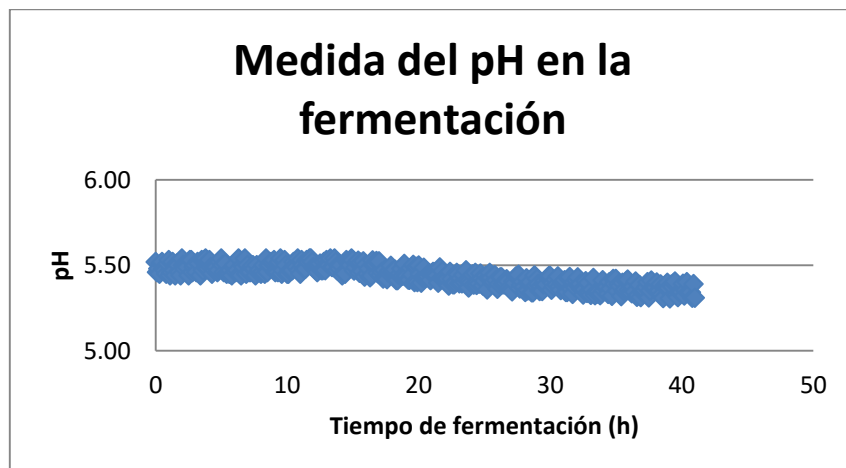
Pruebas de fermentación al 90%

En esta primera etapa se realizó la fermentación en el fermentador rotatorio dándole vuelta al producto todos los días durante la mañana, así durante 96 horas (4 días) que duró en promedio la fermentación. Cabe resaltar que el proceso artesanal de fermentación lleva de 6 a 7 días con lo cual se demostró que el tiempo se ha reducido casi a la mitad y la calidad a simple vista fue mucho mejor y expuesta a menos contaminantes al estar completamente cerrado. En esta primera prueba, a 90% de

fermentación, no se ha realizado control alguno de pH y temperatura con parámetros límite que activen el volteo. A continuación se muestran las gráficas obtenidas.

Figura 4

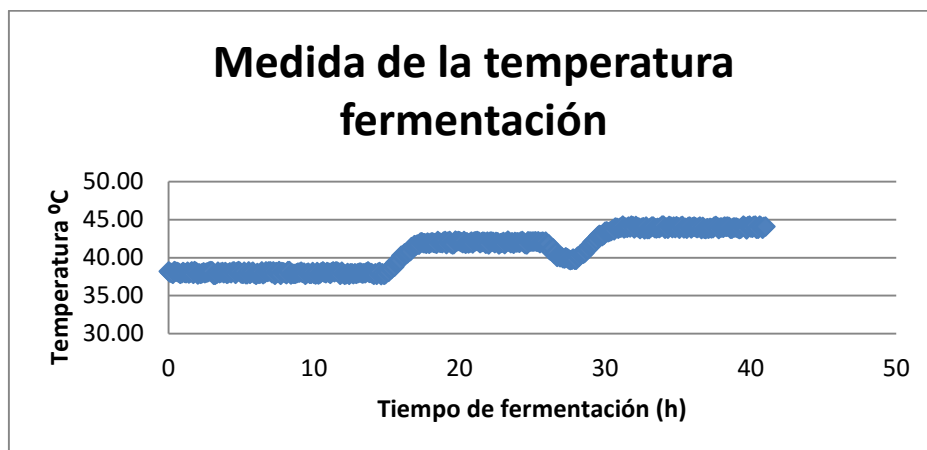
Gráfica de la medida del pH durante la fermentación al 90%



En la Figura 4, sólo se muestran las primeras 40 horas de fermentación para una mejor apreciación de los valores registrados. El pH al final de la fermentación llegó a un valor de 5.26. Estos valores fueron medidos en el centro de la fermentación.

Figura 5

Gráfica de la medida de la temperatura durante la fermentación al 90%



En la Figura 5, sólo se muestran las primeras 40 horas de fermentación para una mejor apreciación de los valores registrados. En cada remoción la temperatura bajaba un grado centígrado, luego por el mismo proceso bajaba un grado más para luego aumentar y mantenerse alrededor de los 44°C. Estos valores fueron medidos en el centro de la fermentación.

Pruebas de fermentación al 40%

La fermentación al 40% tardó en promedio 60 horas (2.5 días). No es lineal con respecto al tiempo de partida para el 90% de fermentación y esto es porque al inicio hay un tiempo en que se debe alcanzar la temperatura de fermentación óptima y empieza la multiplicación acelerada de las bacterias. En este caso, solo se extrajo muestras para verificar que se ha llegado al 40% de fermentación, pero el proceso continuó hasta el 90%. Por este motivo no se incluyen gráficas, por ser las mismas.

Discusión

El fermentador cilíndrico tiene muy buenas prestaciones para la fermentación del cacao debido a que permite una remoción del producto sin tener que sacarlo del contenedor, por lo que no se produce una disminución considerable de la temperatura de fermentación. Ello hace que disminuya el tiempo de fermentación y se logre un producto más uniforme.

En el proceso de fermentación en cajones cuando se debe uniformizar la mezcla, lo que implica sacar el cacao de su contenedor, la temperatura desciende casi a la temperatura ambiente, un promedio de 17°C. Ello hace que la fermentación vuelva a empezar.

Se hace apreciable el aumento de la temperatura de fermentación alrededor de las 14 horas de haber iniciado el proceso. En promedio, a las 60 horas se obtuvo una fermentación al 40% y a las 96 horas se obtuvo el 90% de fermentación.

En la parte inferior y superior del fermentador los valores de temperatura son ligeramente menores debido al contacto con el ambiente. El promedio está entre uno y dos grados centígrados por debajo de la temperatura del centro.

La temperatura de fermentación no llegó a los 50°C en ningún caso debido a que necesariamente se debe dar vuelta una vez al día al fermentador para soltar la masa, que se aprieta. Caso contrario las bacterias no trabajan y la fermentación no sale uniforme. Debido a ello, la parte de automatización no tuvo necesidad de activarse.

La medida del pH resultó irrelevante pues no se relacionaba con ninguna variable. Además, luego que el mucílago desaparece se hace más difícil la medida en seco y el sensor arrojaba medidas erróneas en muchos casos.

Se recomienda el uso del fermentador automático para la obtención de una mejor calidad de fermentación y una reducción en el tiempo de fermentado. Por los costos del mismo quizás se puede trabajar con una versión cilíndrica reducida de 200 kg para remoción manual con una alarma sencilla de temperatura.

Conclusiones

Con el diseño del fermentador cilíndrico automatizado para el volteo de la masa de cacao, se logró reducir el tiempo de fermentación, en promedio, 40% a las 60 horas y 90% a las 96 horas, debido al control (disminución) de la temperatura. Logrando una mejor calidad visible.

Agradecimientos

Agradecemos a APPROCAP por prestar sus instalaciones para el desarrollo de las presentes pruebas y al FINCyT por su apoyo económico en esta investigación.

Referencias bibliográficas

- Copetti, M., Iamanaka, B., Mororó, R., Pereira, J., Frisvad, J., Taniwaki, M. (2012). The effect of cocoa fermentation and weak organic acids on growth and ochratoxin A production by *Aspergillus* species. *International Journal of Food Microbiology*, 155(3), 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.01.026>
- Espinosa, A., Perea, J., Villamizar, C. y Calle, L. (1998). *Fermente bien su cacao: el tambor rotatorio una buena opción*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/20538>
- Lefeber, T., Papalexandratou, Z., Gobert, W., Camu, N. De Vuyst, L. (2012). On-farm implementation of a starter culture for improved cocoa bean fermentation and its influence on the flavour of chocolates produced thereof. *Food Microbiol*, 30(2):379-92. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.12.021>
- Rodriguez-Campos, J, Escalona-Buendía, H.B., Contreras-Ramos, S.M., Orozco-Avila, I., Jaramillo-Flores, M. y Lugo-Cervantes, E. (2012). Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa. *Food Chemistry*, 132(1), 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.078>
- Rodriguez-Campos, J, Escalona-Buendía, Orozco-Avila, I., Lugo-Cervantes, E., Jaramillo-Flores, M. (2011). Dynamics of volatile and non-volatile compounds in

cocoa (*Theobroma cacao* L.) during fermentation and drying processes using principal components analysis. *Food Research International*, 44(1), 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.028>

Villamizar, M. (2008). *Análisis y diseño de la automatización de un tambor rotativo para el proceso de fermentación del cacao mediante la utilización de módulos analógicos configurables en el centro de investigación para el fomento (CIFCA) de la Universidad Francisco de Paula Santander*. [Tesis de Ingeniero, Francisco de Paula Santander]. <https://bit.ly/2YdWdHL>

Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e Ingeniería de Alimentos, Ingeniería Bioquímica Tecnología del Cacao. (2011). Construcción del fermentador de tambor rotatorio". *Boletín Técnico*, 1