



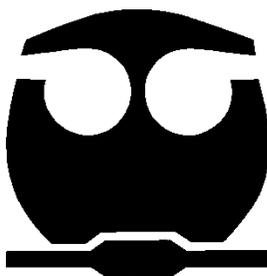
FACULTAD DE QUÍMICA

Estudio del comportamiento de la viscosidad cortante y las propiedades reológicas, módulo elástico y módulo viscoso; en una formulación de chocolate oscuro modificada con fosfatidos de amonio

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA
TAYDE ROXANA MORALES RANGEL



MÉXICO, D.F.

AÑO 2015





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. RAFAEL HERRERA NÁJERA

VOCAL: DR. ÁNGEL ENRIQUE CHÁVEZ CASTELLANOS

SECRETARIO: M. I. Q. RODOLFO RUÍZ TREJO

1° SUPLENTE: Q.F.B. JUAN MANUEL DÍAZ ÁLVAREZ

2° SUPLENTE: I.Q. ALEJANDRO RAFAEL ZAVALA RIVAPALACIO

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA

M. I. Q. RODOLFO RUÍZ TREJO

SUSTENTANTE

TAYDE ROXANA MORALES RANGEL

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	16
I. OBJETIVOS.....	18
II. GENERALIDADES	20
:-: Capítulo 1 :-:.....	21
EL CACAO	21
1.1 Definición	21
1.2 Descripción botánica	21
1.2.1 Requerimientos Agroecológicos	23
1.2.2 Variedades de cacao	25
2.2.3 Composición química del cacao	26
1.3 Producción de cacao.....	30
1.3.1 Producción mundial de cacao	30
1.3.2 Producción de cacao en México	33
1.4 Historia	36
1.4.1 Orígenes del cacao.....	38
1.4.2 Conquista del cacao	41
1.5 Transformación industrial del cacao.....	44
1.5.1 Cosecha.....	44
1.5.2 Fermentación.....	45
1.5.3 Secado.....	46
1.5.4 Clasificación y almacenamiento del grano	48
1.5.5 Procesamiento del grano	50

:-: Capítulo 2 :-:	57
CHOCOLATE	57
2.1 Definición de chocolate	57
2.2 Chocolate amargo	57
2.3 Elaboración de chocolate amargo	58
2.3.1 Ingredientes	59
2.3.2 Proceso de elaboración de chocolate amargo	61
:-: Capítulo 3 :-:	67
REOLOGÍA EN ALIMENTOS	67
3.1 Definición de Reología	67
3.1.1 Medición de los parámetros reológicos	73
3.1.2 Viscoelasticidad	77
3.1.3 Parámetros viscoelásticos	79
3.1.4 Región Viscoelástica lineal	82
3.2 Análisis reológico del chocolate	82
3.3 Propiedades de fluencia del chocolate	85
3.3.1 Tamaño de partícula	85
3.3.2 Humedad – tiempo de conchado	87
3.3.3 Aditivos en formulación de chocolate	88
III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	93
i. Pruebas físicas y químicas de los insumos	96
Manteca de cacao	96
Cocoa	98
Azúcar	98
Emulsificantes	98
ii. Formulación de chocolate amargo	99
iii. Conchado	99
iv. Moldeado y desmolde	100
v. Mediciones reológicas	100

a) Prueba de flujo	101
b) Prueba oscilatoria	101
vi. Elaboración de piezas de chocolate para venta y consumo.....	101
Temperado	101
Empaque	102
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	103
Pruebas físicas y químicas de los insumos.....	104
Mediciones reológicas.....	105
I. Evaluación de las curvas de flujo	105
II. Evaluación de la prueba oscilatoria.....	115
III. Presentación comercial del chocolate amargo.....	131
V. CONCLUSIONES.....	133
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	136
VII. ANEXOS	139
Anexo I. Control de calidad de materias primas	140
Anexo II. Control de calidad de piezas de chocolate para consumo	154
Estimación del tiempo característico.....	155
Chocolate.....	151

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Requerimientos agrícolas para la plantación de cacao.	23
Tabla 2.	Requerimientos del suelo para Theobroma cacao.	24
Tabla 3.	Análisis bromatológico de los granos de cacao luego de ser sometidos a fermentación, secado y descascarillado.	27
Tabla 4.	Compuestos químicos presentes en el cacao.	28
Tabla 5.	Productores y producción de granos de cacao	32
Tabla 6.	Precios anuales del grano de cacao.	33
Tabla 7.	Municipios productores de cacao en el estado de Tabasco	34
Tabla 8.	Municipios productores de cacao en el estado de Chiapas.	35
Tabla 9.	Descripción de defectos del grano de cacao.	49
Tabla 10.	Aromas generados por reacción de glucosa y un aminoácido.	52
Tabla 11.	Productos de degradación de aminoácidos presentes en productos de cacao.	54
Tabla 12.	Composición %m/m en base seca de algunos tipos de chocolate. Norma Oficial Mexicana 186-SSA1/SCFI del 2002.	57

Tabla 13.	Composición %m/m de la manteca de cacao.	59
Tabla 14.	Formas polimórficas de la manteca de cacao. Beckett, S., 1988.	65
Tabla 15.	Comportamiento de parámetros reológicos según el tamaño de geometría.	76
Tabla 16.	Formulaciones trabajadas en el laboratorio para la elaboración Chocolate Amargo.	99
Tabla 17.	Resultados de calidad de insumos para la elaboración de muestras.	104
Tablas 18.	Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con fosfatida.	105
Tablas 19.	Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con lecitina de soya.	107
Tabla 20.	Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con PGPR.	110
Tabla 21.	Valores de flujo para chocolate amargo con mezclas de emulsificante.	112
Tabla 22.	Tiempos característicos de las muestras de chocolate amargo estudiadas.	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de la distribución de la plantación de cacao en el mundo.	21
Figura 2.	Plantación de cacao. (A) Árbol de cacao. (B) Flor de cacao. (C) Mazorca de cacao madura. Pichucalco, Chiapas. (D) Baya de cacao abierta.	22
Figura 3.	Variedades comerciales de <i>Theobroma cacao</i> L.	25
Figura 4.	Detalle de un vaso clásico maya. Karl Taube, 1993.	37
Figura 5.	Detalle Pochteca del Árbol de cacao. Códice Fejérvary-Mayer.	38
Figura 6.	Ek-Chuah y Quetzalcóatl, Dioses del cacao.	39
Figura 7.	Chocolatière de plata usada en el Siglo XVIII.	
Figura 8.	Químico holandés Coenraand Van Houten. Máquina hidráulica de desengrasado. Anuncios de productos Van Houten.	43
Figura 9.	Publicidad de los pioneros en la industria del Chocolate.	43
Figura 10.	Cambios de coloración durante la maduración del fruto de cacao.	44
Figura 11.	Técnicas de fermentación empleadas en regiones de producción africanas y granos de cacao frescos.	45
Figura 12.	Métodos de secado el grano de cacao. INIFAP, 2011.	47

Figura 13.	Pruebas de corte para el grado de calidad del grano de cacao.	48
Figura 14.	Proceso de transformación de grano de cacao fermentado y seco.	50
Figura 15.	Efecto del tamaño del grano de cacao en el grado de tostado.	51
Figura 16.	Granos de cacao en distintas etapas de preparación industrial. Cacao seco fermentado, tostado y descascarillado.	55
Figura 17.	Ingredientes base para la formulación de chocolate amargo.	58
Figura 18.	Molécula de sacarosa.	61
Figura 19.	Descripción de las operaciones unitarias para la elaboración de chocolate. Beckett, S., 1994.	62
Figura 20.	Orientación esquemática de los propuestos dímeros de triglicéridos de las formas α , β y β' , con la respectiva célula de acoplamiento de cadena y la proyección de las direcciones de las cadenas.	64
Figura 21.	Diagrama de la deformación de un cuerpo por la aplicación de un esfuerzo.	68
Figura 22.	Perfil de velocidades entre placas paralelas.	69
Figura 23.	Diagrama de definición de flujo cortante.	70
Figura 24.	Curvas de flujo para distintos comportamientos en materiales.	72

Figura 25.	División de reómetros y geometrías para mediciones reológicas.	73
Figura 26.	Reómetro de esfuerzo controlado. TA Instruments.	75
Figura 27.	Esquema de geometría de placas.	76
Figura 28.	Deformación oscilatoria aplicada a un cuerpo.	
Figura 29.	Descripción de una gráfica de análisis oscilatorio.	80
Figura 30.	Representación del módulo complejo como combinación de dos vectores que son los módulos elástico (G') y viscoso (G'').	81
Figura 31.	Concepto de esferas equivalentes para la medición de tamaño de partícula.	87
Figura 32.	Micrografías de cocoa estándar con <1% de manteca de cacao.	86
Figura 33.	Estructura del comportamiento de un emulsificante en emulsión "oil in water" – O/W	89
Figura 34.	Diagrama de orientación de un emulsificante - partículas de azúcar.	90
Figura 35.	Estructura química de fosfatidos de amonio.	
Figura 36.	Estructura química de poliglicerol polirricinoleato (PGPR).	91
Figura 37.	Estructura química de lecitina se soya.	92
Figura 38.	Equipo de conchado.	99

Figura 39.	Reómetro GA-R2 TA Instruments.	
Figura 40.	Geometría de platos paralelos.	
	.....	100
Figura 41.	Distribución de los ingredientes de la formulación de chocolate.	
	.....	106
Figura 42.	Figuras de chocolate moldeado listo para consumo.	
	.....	132
Figura 43.	Descripción esquemática para la descripción de olor del chocolate y sus derivados.	
	.....	149

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1.	Metodología empleada para el análisis reológico de formulación de chocolate oscuro modificado con fosfatidos de amonio.	
	.....	93
Diagrama 2.	Proceso de elaboración de chocolate amargo para consumo.	
	.....	94

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.	Diferentes tipos de reograma	.....	82
Gráfica 2.	Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo y con fosfatida al 0.4%, 0.6% y 1.0% en la formulación.		
	.....		105
Gráfica 3.	Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo, lecitina de soya al 0.4% y 0.6% y muestras de chocolate amargo con fosfatida en la composición de la formulación.		
	.....		108

Gráfica 4.	Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo, PGPR al 0.15%, 0.3% y 0.4% y muestras de chocolate amargo con fosfatida en la composición de la formulación.	109
Gráfica 5.	Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo y mezclas de aditivos en la composición de la formulación.	111
Gráfica 6.	Bosquejo de valores de umbral y viscosidad plástica de muestras de chocolates comerciales, muestras con presencia de fosfatidos de amonio y mezclas con emulsificantes comerciales.	113
Gráfica 7.	Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida en la formulación y análisis de módulo elástico en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s].	115
Gráfica 8.	Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida en la formulación y análisis de módulo viscoso en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s].	117
Gráfica 9.	Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida y análisis de módulo complejo en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s].	118
Gráfica 10.	Análisis de módulo elástico en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de las muestras de chocolate amargo 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales de chocolate amargo	119
Gráfica 11.	Análisis de módulo viscoso en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de las muestras de chocolate amargo 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales de chocolate amargo	121

Gráfica 12.	Análisis de módulo complejo en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de las muestras de chocolate amargo 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales de chocolate amargo.	122
Gráfica 13.	Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida y análisis de tangente (δ) en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s].	124
Gráfica 14.	Tangente (δ) en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] para muestras de chocolate amargo con 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales.	125
Gráfica 15.	Ángulo de desfase en las muestras de chocolate con distintos emulsificantes en la formulación. Series de menor a mayor concentración de emulsificantes.	127
Gráfica 16.	Intersección de G' y G'' para la obtención de tiempo de relajamiento de la muestra con 0.4% de fosfatida.	129

ANEXO I

Ficha 1.	Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.	140
Ficha 2.	Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.	
Ficha 3.	Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.	147

Ficha 4.	Control de calidad del grano Theobroma cacao empleado para la obtención de licor de cacao.	150
Ficha 5.	Análisis de lote cacao fermentado y seco.	152
Ficha 6.	Emulsificantes.	153
MEB 1.	Partícula de cocoa de 10 micras, distribución y morfología (x 1, 000)	141
MEB 2.	Micrografías de cocoa estándar. (i) Morfología de partículas de los sólidos de cacao; como se puede apreciar no tienen forma definida y presentan bordes afilados característicos del proceso de molienda al que fue sometido el grano de cacao. (ii) Partículas de cacao aglomeradas por la presencia de glóbulos grasos -manteca de cacao-. (iii) – (iv) Sólidos de cacao de 10 micrometros a diferente aumento con morfologías distintas, presentes en un mismo lote. (v) Partícula de cacao de mayor tamaño enfocada por MEB.	142
MEB 3.	Micrografía a 1.500. Partícula característica de licor de cacao obtenido de la molienda del grano fermentado y seco y partícula de cocoa comercial.	143
PSD 1.	Resultados de distribución de tamaño de partícula de cocoa Turín.	145
PSD 2.	Resultados de distribución de tamaño de partícula de licor de cacao.	146

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo bosquejar un panorama del efecto reológico que el emulsificante denominado fosfatidos de amonio (E-442 o fosfatida) tiene sobre el chocolate amargo elaborado con dicho material, en comparación con el efecto que tienen los emulsificantes más comunes en la industria, tales como poliglicerol polirricinoleato (PGPR) y lecitina de soya. Básicamente, los sistemas estudiados son suspensiones semi-sólidas de cocoa (sólidos de cacao) en una matriz grasa (manteca de cacao), azúcar y sustancias coadyuvantes en la formulación como lo son los emulsificantes, cuyo desempeño reológico es crítico en el proceso de elaboración del chocolate.

Se investigó el comportamiento reológico de una formulación de chocolate amargo con presencia de fosfatidos de amonio en la composición del producto. Las muestras evaluadas presentan 35% de manteca de cacao y una estandarización de la distribución de tamaño de partícula (Particle Size Distribution, PSD) de los sólidos de cacao y azúcar con un valor de 126.2 μm . Básicamente, se investigó el efecto que tiene el tipo y la cantidad de emulsificante, utilizando para ello los siguientes emulsificantes:

- 1) Fosfatidos de amonio (conocido como fosfatida con número de registro en el Codex Alimentarius E-442)
- 2) Poliglicerol polirricinoleato (PGPR con número de registro en el Codex Alimentarius E-476)
- 3) Lecitina de soya (con número de registro en el Codex Alimentarius E-322)

Además, se estudiaron muestras preparadas con mezclas de dichos emulsificantes: fosfatidos de amonio – poliglicerol polirricinoleato, fosfatidos de amonio – lecitina de soya y poliglicerol polirricinoleato – lecitina de soya. Las muestras analizadas fueron elaboradas según las especificaciones establecidas por la NOM-186-SSA1/SCFI-2002 Productos y servicios. Chocolate y productos similares, y derivados de cacao.

Se utilizó un reómetro de esfuerzo controlado AR-G2 de TA Instruments para determinar el comportamiento reológico de las muestras de chocolate mediante dos tipos de prueba: 1) pruebas de esfuerzo cortante simple en estado estacionario para determinar la viscosidad cortante y prueba oscilatoria de pequeña amplitud en flujo cortante simple (IOC, 2000); los resultados se analizaron basándose en el modelo de Casson, método de análisis aprobado por la Organización Internacional del Cacao.

Se realizó análisis estadístico de los datos obtenidos por medio de una ANOVA de dos factores con una sola muestra por grupo para cada una de las pruebas reológicas realizadas en el laboratorio a las muestras elaboradas de chocolate amargo.

Los resultados indican que es posible adaptar el valor esfuerzo umbral (también conocido como límite elástico) y la viscosidad del chocolate en estado líquido (a temperatura de 40°C – temperatura de proceso) por medio de los ajustes apropiados en la proporción del emulsificante en la formulación. Las muestras analizadas no presentan cambio significativo en el esfuerzo umbral presentando cualquier emulsificante en cualquiera de las concentraciones estudiadas; sin embargo, si existe una variación significativa en la viscosidad analizada entre las muestras con presencia de diferentes emulsificantes en la formulación.

En comparación con la presencia de emulsificantes individuales en la formulación, las muestras elaboradas con las mezclas de dos de estos aditivos, presentan una disminución significativa en viscosidad y umbral de fluencia; siendo la mezcla de poliglicerol poliricinoleato (PGPR) – lecitina de soya al 0.15% y 0.3% respectivamente, la mezcla con mejores efectos en reducción de viscosidad, atribuyendo una disminución en la resistencia al movimiento de las partículas presentes en la suspensión que significa el chocolate.

INTRODUCCIÓN

En el mundo, México no figura entre los principales productores de cacao, ocupa tan sólo el décimo primer lugar, según datos de la FAO con estimados para el pasado año 2010. El mercado nacional e internacional de producción de chocolate está dominado por grandes empresas y las predicciones para los productores nacionales son de disminución de su actividad debido a su baja competitividad en el marco de la globalización. El desarrollo de la industria chocolatera nacional debe estar respaldado, entre otras cosas, por el estudio científico de las etapas asociadas al procesamiento del cacao en su camino a la producción de chocolate, un derivado con mayor valor agregado.

El chocolate es un alimento de gran tradición en nuestro país, donde el consumo es prehispánico, por lo que la bebida de chocolate está asociada a un gran simbolismo que contribuye a crear una atmósfera de confianza entre quienes lo comparten y de comunión en el ámbito familiar. Debe distinguirse entre el chocolate destinado para bebida de aquel chocolate formulado para consumirse en barra. La barra de chocolate es fundamentalmente una combinación de licor de cacao (obtenido de la molturación de los granos de cacao fermentados, secos y tostados) con manteca de cacao, a la cual es posible agregar ingredientes como azúcar, sólidos de leche, frutos secos y aditivos modificadores de más de una propiedad intrínseca del producto como grasa vegetal, edulcorantes y especialmente emulsificantes, etc.

En la formulación del chocolate, la manteca de cacao es el producto de mayor valor monetario, por lo que es deseable limitar la proporción de este componente en la formulación, sin detrimento de la calidad. Por otra parte, un exceso de manteca contribuye a problemas como la migración de la grasa hacia la superficie produciendo una apariencia blancuzca indeseable y a la posible deformación del producto debido a cambios de temperatura, disminuyendo en ambos casos la vida de anaquel del producto final.

Los emulsificantes son aditivos que tienen como función mantener la dispersión de fases no miscibles, por lo que pueden mejorar las propiedades de flujo del chocolate durante el procesamiento; además contribuyen a mejorar la sensación bucal por la fusión y flujo del producto.

La generación de conocimiento primario del comportamiento del chocolate, constituye un apoyo a la competitividad de pequeñas y medianas empresas dentro de la importancia de las economías de escala.

I. OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar una caracterización reológica de la influencia que atañe el emulsificante Fosfatidos de amonio (fosfatida), en una formulación de chocolate oscuro al 35% de manteca de cacao y una distribución de tamaño de partícula de 126.2 μm de los sólidos presentes en la formulación.

Actividades

- 1.- Caracterizar física y químicamente las materias primas destinadas a la formulación del chocolate oscuro: manteca de cacao, cocoa comercial y azúcar en polvo (azúcar glass).
- 2.- Formular chocolate oscuro con base en la Norma Oficial Mexicana 186-SSA1/SCFI-2002 y las especificaciones del uso del aditivo establecidas por la JECFA (Join Expert Committee of Food Additives).
- 3.- Procesar un lote de chocolate oscuro sin aditivo, cubriendo la operación de conchado y sin temperar.
- 4.- Elaborar un lote de chocolate oscuro por cada una de las concentraciones de fosfatidos de amonio a analizar (0.4%, 0.6% y 1%), cubriendo las mismas condiciones de proceso que el chocolate sin aditivo en la formulación.
- 5.- Elaborar un lote por cada una de las concentraciones de aditivos comerciales más empleados en la industria chocolatera: lecitina de soya (0.3%, 0.4% y 0.6%); y poliglicerol poliricinolato (PGPR) (0.15%, 0.3% y 0.4%). Así como la elaboración de un lote por cada una de los arreglos sinérgicos entre los aditivos empleados: fosfatida-lecitina, lecitina-PGPR y PGPR-fosfatida.
- 6.- Realizar la caracterización reológica de los lotes de chocolate elaborados.
- 7.- Comparar perfil reológico del uso de fosfatidos de amonio en la elaboración de chocolate con los resultados de las formulaciones de chocolate con presencia de poliglicerol polirricinoleato, lecitina de soya y las mezclas correspondientes.

II. GENERALIDADES

::: Capítulo 1 :::

EL CACAO

1.1 Definición

El cacao es la semilla proveniente del fruto del árbol *Theobroma cacao* L¹ de la familia de las Esterculiáceas, es una planta originaria del bosque húmedo tropical de América del Sur. La producción de esta semilla se encuentra distribuida en el mundo entre los 10 grados de latitud norte y sur del ecuador, concentrándose los mayores volúmenes en los países tropicales, principalmente en África, Asia y América Central (Figura 1).



Figura 1.- Mapa de la distribución de la plantación de cacao en el mundo.
Fuente: Asociación Peruana de Productores de Cacao (APPCACAO)-2007.

1.2 Descripción botánica

Existen alrededor de 20 especies de *Theobroma cacao*, aunque sólo algunas producen el fruto con el valor comercial para la elaboración de chocolate. El árbol de cacao puede medir de 6 a 8 metros de altura y en algunas excepciones alcanza 20 metros (su tamaño depende en gran parte de las condiciones del suelo donde se cultive).

¹ *Theobroma cacao* L. nombre científico dado por Linneo en 1753. Theo (Dios), broma (alimento).

Crece con un solo tallo hasta alcanzar de 1.5 a 2.0 metros de altura para luego emitir de 3 a 5 ramas laterales, esta conformación botánica recibe el nombre de horqueta. (Urquhart, 1963). Las flores del cacao nacen a los 3 o 4 años de edad del árbol, directamente del tallo donde se presenta un crecimiento secundario conocido como cojinete floral.

El fruto es descrito botánicamente por Hardy (1960) como una baya sostenida por un péndulo leñoso; el fruto es una baya o mazorca ovoidea, grande y aguda de dimensiones aproximadas que van de 25 a 30 cm de largo y de 10 a 15 cm de grueso; las semillas son de forma ovoide, blancas y pardas cuando están secas, de unos 2 cm de diámetro y de sabor muy amargo. Cada mazorca contiene de 26 a 30 granos. (Figura 2). La parte comestible de las semillas son sus cotiledones, que sufren cambios necesarios durante el proceso de postcosecha y manufactura, dando como resultado el sabor y aroma tan apreciado por los amantes del chocolate.

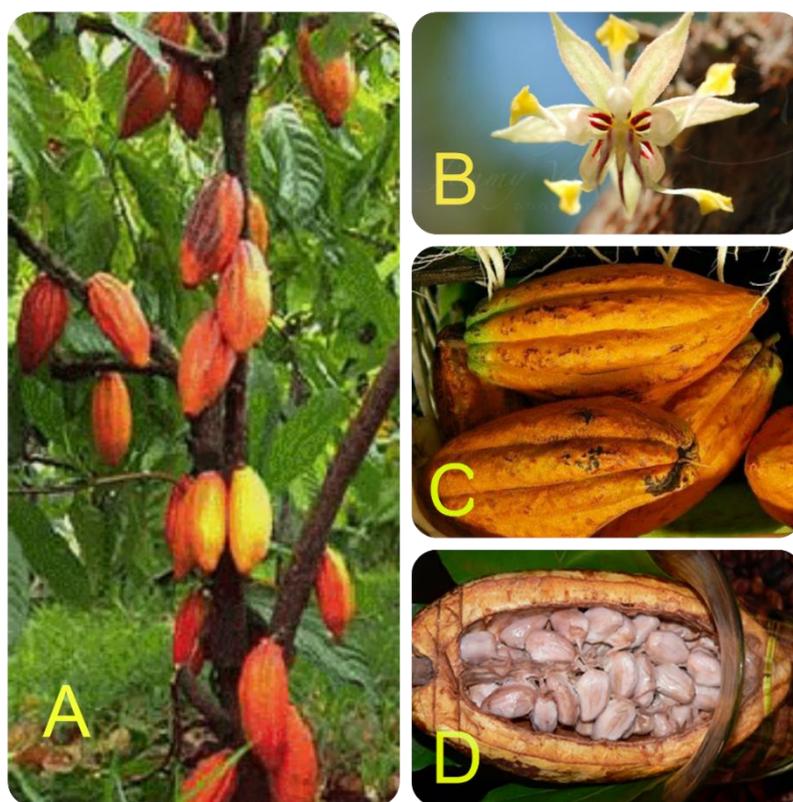


Figura 2.- Plantación de cacao. (A) Árbol de cacao. (B) Flor de cacao. (C) Mazorca de cacao madura de la zona de Pichucalco, Chiapas. (D) Baya de cacao abierta.

FUENTE: Fundación cacao México.

1.2.1 Requerimientos Agroecológicos

La calidad del grano depende de diversos factores como la variedad del material genético, condiciones de clima y suelo, manejo agronómico y la tecnología de postcosecha; este último factor se puede considerar el más importante ya que da pauta a la conservación y mejora de las características organolépticas del grano de cacao (León, 2000) para ser implementado en la industria chocolatera.

Los factores climáticos críticos para el desarrollo del cacao son la temperatura y la humedad; a estos se le unen el viento y la luz o radiación solar. El cacao es una planta que se desarrolla bajo sombra. La humedad relativa también es importante ya que puede contribuir a la propagación de algunas enfermedades del fruto.

Estas exigencias climáticas han hecho que el cultivo de cacao se concentre en las tierras bajas tropicales, como se pudo apreciar en la Figura 1. Los requerimientos agrícolas se enlistan en la Tabla 1:

Tabla 1.- Requerimientos agrícolas para la plantación de cacao.

Requerimiento	Descripción
Precipitación	La precipitación pluvial es en general de 1,200 a 3,000 mm ² y óptima de 1,800 a 2,500 mm ² . Presenta baja tolerancia al déficit de agua y en los meses con menos de 100 mm se genera un déficit hídrico que afecta a la floración y brote de hojas en el árbol.
Temperatura	El rango promedio anual de temperatura es de 23 a 28 °C, siendo el óptimo de 25.5 °C.
Altitud y Humedad	Se cultiva casi desde el nivel del mar y hasta los 1,200 metros sobre nivel del mar, siendo el óptimo de 300 a 400 y de 600 a 800. Humedad relativa anual promedio en un rango de 70 a 80%.

El suelo es la fuente directa de nutrición y la obtención de cualidades físicas y químicas de las semillas obtenidas tras la cosecha; el cacao requiere suelos ricos en materia orgánica, profundos, franco arcilloso y de topografía regular (Tabla 2).

El factor limitante del suelo en el desarrollo del cacao es la delgada capa húmica; esta capa se degrada muy rápidamente cuando la superficie del suelo queda expuesta al sol, al viento y a la lluvia directa.

Por ello es común el empleo de plantas leguminosas auxiliares que proporcionen la sombra necesaria y sean una fuente constante de sustancias nitrogenadas para el cultivo (Andrade, 2011).

Tabla 2.- Requerimientos del suelo para Theobroma cacao.

<p>Propiedades físicas</p>	<p>Requiere una profundidad de 0.80 – 1.50 metros. Textura del suelo mediana (esto se refiere a la serie de los francos, franco-arcilloso o franco-arenoso): 30% arcilla, 50% arena y 10 a 20% limo. No se recomiendan suelos finos o muy gruesos. Con alto requerimiento de buena estructura con 66% de porosidad y nunca menos del 10%. Buena retención de humedad y manto freático encontrado a una profundidad mayor de 1.5 metros.</p>
<p>Propiedades químicas</p>	<p>Un pH óptimo de 6.0 – 7.0; % materia orgánica >3%; relación C/N mínimo de 9. Capacidad de intercambio catiónico: la plantación requiere más de 12 meq por 100g de suelo en la superficie y más de 5 meq en el subsuelo. Contenido de Ca mayor de 8 meq por cada 100 g de suelo; Mg mayor a 2meq; K mayor a 0.24 meq y más de 0.2 ppm de B. Saturación de bases mayor del 35%.</p>

1.2.2 Variedades de cacao

El cacao como cualquier otra planta posee diversas variedades con propiedades particulares; el cacao comercial está clasificado en tres (Figura 3), cada una de dichas variedades hacen un producto único en color, aroma y sabor, aspectos importantes que tanto el consumidor como el catador tienen en cuenta para la selección de los lotes destinados a la línea de producción de chocolate (Beckett S. T., 2008).



◦ Cacao Criollo ◦◦ Cacao Forastero ◦◦◦ Cacao Trinitario

Figura 3.- Variedades comerciales de *Theobroma cacao* L.
FUENTE: CACAO MÉXICO

a) Criollo o nativo

Es el cacao genuino y fue bautizado así por los españoles al llegar a México. Se cultiva en Perú, Venezuela, Honduras, Colombia, Ecuador, Nicaragua, Guatemala, Trinidad, Bolivia, Jamaica, México, Granada y en el Caribe, en la zona del océano Índico y en Indonesia. Es un cacao reconocido y de gran calidad, de escaso contenido en taninos, reservado para la fabricación de los chocolates más finos. El árbol es frágil y de escaso rendimiento.

El grano es de cáscara fina, suave y poco aromática. Representa el 10% de la producción mundial.

b) Forastero o campesino

Originario de la alta Amazonia. Se trata de un cacao normal, con porcentaje de taninos más elevado. Es el más cultivado y proviene normalmente de África. El grano tiene una cáscara gruesa, es resistente y poco aromático. Para neutralizar sus imperfecciones, requiere un intenso tueste, de donde proceden el sabor y el aroma a quemado de la mayoría de los chocolates. Los mejores productores usan granos de forastero en sus mezclas, para dar cuerpo y amplitud al chocolate, pero la acidez, el equilibrio y la complejidad de los mejores chocolates provienen de la variedad criolla.

c) Trinitario o híbrido.

Es un cruce entre el criollo y el forastero, aunque su calidad es más próxima al del segundo. Como su nombre sugiere, es originario de Trinidad (en las Antillas, Trinidad y Tobago) donde, después de un terrible huracán que en 1727 se destruyeron prácticamente todas las plantaciones de la Isla. De este modo, heredó la robustez del cacao forastero y el delicado sabor del cacao criollo, y se usa también normalmente mezclado con otras variedades.

2.2.3 Composición química del cacao

La composición química del cacao es muy compleja dependiendo del suelo y de las condiciones de crecimiento donde es cultivado, resultando un perfil variable del grano. Como se puede apreciar en la Tabla 3 poco más de la mitad de la masa del grano seco es grasa, y la composición varía según la variedad de cacao; esa materia grasa tiene el nombre de <<*manteca de cacao*>> y los sólidos son conocidos industrialmente como <<*cocoa*>> (Sección 1.5.5) Además de la manteca de cacao, las proteínas son el porcentaje en la composición más alta, seguido por los almidones. Para el almacenamiento del grano y garantizar su seguridad microbiológica es necesario secarlo a una humedad media del 3%; esto para evitar el crecimiento de hongos sobre el grano.

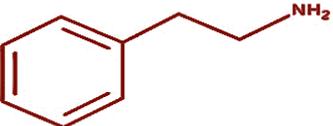
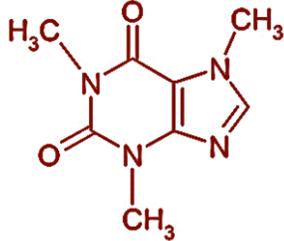
La porción restante del grano de *Theobroma cacao* contiene centenares de compuestos identificados, responsables de las más variadas respuestas al ingerir el chocolate elaborado con el grano.

Tabla 3.- Análisis bromatológico de los granos de cacao luego de ser sometidos a fermentación, secado y descascarillado).

Composición química del grano de cacao (g/100g de cacao descascarillado)	
<i>Lípidos (manteca de cacao)</i>	48 a 57
<i>Proteína</i>	11 a 24
<i>Almidón</i>	6 a 9
<i>Agua</i>	2 a 5
<i>Cenizas</i>	2.5 a 4.0
<i>Fibra</i>	2 a 3
<i>Teobromina</i>	0.8 a 1.4
<i>Cafeína</i>	0.1 a 0.7

El estudio más amplio del chocolate es el del médico francés, Hervé Robert, quien en su libro *Les vertus thérapeutiques du chocolat* (Coe, 2013) describe ampliamente los principales compuestos químicos presentes en el cacao que atribuyen más de una propiedad al producto principal elaborado con tanpreciado grano: el chocolate (Tabla 4). Las opiniones médicas sobre los efectos del chocolate varían ampliamente; el Dr. Robert (entre muchos más), describe el efecto de la cafeína, teobromina, serotonina y feniletilamina encontrados en el grano de cacao, como agentes antidepresivos y antiestrés que intensifican las actividades placenteras. Dos de las sustancias mencionadas, que comprenden del 1 al 2% del grano de cacao, tienen efectos fisiológicos en los humanos: los alcaloides (cafeína y teobromina).

Tabla 4.- Compuestos químicos en el cacao.

	<p style="text-align: center;">Feniletilamina</p> <p>Sustancia producida en el cerebro, estimulante del sistema nervioso; crea sensación de placer e intensifica las emociones. Dentro de las sensaciones se encuentran excitación, nerviosismo, taquicardia, mayor actividad y resistencia al cansancio.</p>	
		<p style="text-align: center;">Theobromina</p> <p>Fuente principal: cacao. Compuesto químico alcaloide. Estimula el sistema nervioso provocando sensación de placer; es vasodilatador, relajante de la musculatura bronquial. Mejora la digestión, desempeñando una función esencial a nivel cardiaco.</p>
	<p style="text-align: center;">Cafeína</p> <p>Estimulante del sistema nervioso central, produce un efecto temporal de la restauración del nivel de alerta y eliminación de la somnolencia.</p>	

Como se menciona en la tabla anterior, la teobromina es el alcaloide principal del cacao; los alcaloides son compuestos orgánicos complejos con moléculas de nitrógeno; peculiarmente de gusto amargo. Se encuentran principalmente en las hojas, semillas o raíces de una amplia variedad de vegetales.

Como todo alcaloide, la teobromina es estimulante del sistema nervioso central; tiene una función específica de dilatar los vasos sanguíneos (en la historia médica se empleaba con tal fin). También es diurética, es decir, estimula la producción de orina; al ser farmacológicamente menos activa que la cafeína no figura dentro de los fármacos más usados (Velayos, 2009).

Las declaraciones de las autoridades de salud bombardean con una gran cantidad de información colateral a las propiedades de más de un producto de uso cotidiano; el chocolate no se aleja de las suspicaces críticas, sin embargo, deben considerarse muchos factores de consumo, más que las desalentadoras prohibiciones nutricionales.

Una de las consideraciones a tomar es que los estudios toxicológicos que demuestran los efectos de un compuesto son realizados con el compuesto químicamente puro, cosa que difícilmente el consumidor verá. Lo anterior tiene lógica científica, sin embargo las dosis que realmente se ingiere en un producto comercial fluctúa según la materia prima empleada; por ejemplo, en una taza de café la cantidad real de la cafeína (alcaloide principal) está en función del cafetal, el proceso de transformación (temperaturas y tiempos) así como los gustos personales del consumidor en torno a la intensidad, tamaño de la taza y frecuencia de consumo.

Mucho antes de asombrarse con las consecuencias al ingerir un producto, en este caso el chocolate, se debe analizar la cantidad real de cafeína que contiene 100g de chocolate amargo al 70% de cacao; es decir 0.49% de cafeína.

Se reporta que la ingesta diaria admisible de cafeína es de 200 mg por peso corporal, al día (FAO, 2014); si una barra de 100g tiene 490mg de cafeína; un *chocohólico* de 46 kg puede consumir hasta 18 barras de chocolate en una jornada; un margen bastante amplio para darse más que un simple gusto - más que culinario o desempance - es gula y teobromina, el placer que al apetito en todas sus expresiones domina.

Cabe mencionar que todo cuidado en la dieta debe estar basado en la educación del equilibrio alimenticio y en la actividad física diaria.

1.3 Producción de cacao

Debido a que cada día son más los consumidores de chocolate, el principal pero no único producto elaborado a partir del grano de cacao y con la alteración climática que afecta directamente a los productores, es más que lógico el aumento de demanda que no se puede satisfacer de esta materia prima tan preciosa.

En 2013, el mundo ha consumido por primera vez, más de cuatro millones de toneladas de cacao, un 32% más que hace diez años. El aumento en la demanda ha empujado el precio del bien precioso en más del 9% desde el comienzo del año y casi el 40% en un año productivo (FAO, 2014).

1.3.1 Producción mundial de cacao

La cuna del cacao, América Latina; está muy lejos de África Occidental en volumen de producción, pero el aumento reciente de la demanda en Asia podría significar un cambio en la producción y disposición del grano de cacao para la industria tanto confitera como farmacéutica.

En la práctica, todos los negocios del cacao se dan mediante contratos de compra-venta, los cuales son desarrollados por asociaciones de comercio de cacao, como la Asociación de Comerciantes de Cacao de América y la Federación de Comerciantes de Cacao en Europa.

Actualmente el árbol de cacao se cultiva comercialmente en Sudamérica y en las Indias Occidentales, en oeste de África, en Malasia y en Nueva Guinea. La mayor parte de cacao destinado al comercio internacional se cultiva en África occidental, siendo el cacao recolectado en Ghana el de mayor calidad y Costa de Marfil el mayor productor mundial, colocando al continente africano con el 71% de la producción total de cacao en el mundo (ICCO, 2012).

La Organización Internacional de Cacao (ICCO) tiene en sus miembros países exportadores donde figura Costa de Marfil, el Congo y República Dominicana; y países importadores principalmente Austria, República Checa, Bélgica, Bulgaria, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Italia, Suiza, España y Reino Unido.

La ICCO indica que la producción mundial de cacao en grano descendió en más del 6% en la campaña cacaotera 2011/2012 respecto a la campaña anterior, situándose en 4.05 millones de toneladas. La producción conjunta de Costa de Marfil y Ghana disminuyeron en más de 180 000 toneladas comparado con el resultado de la campaña anterior, para situarse en 2,355 millones de toneladas, representando aún así más del 58% de la producción mundial de cacao. Por el contrario, la producción del continente americano aumentó más del 12% (630 000 toneladas), siendo Ecuador y Brasil los responsables de tal aumento en la producción latinoamericana (Tabla 5).

Jürgen Steinemann, director general de Barry Callebaut, asegura que Asia tiene un excelente potencial en el mercado de cacao; podría expandirse entre 5 y 9% durante los próximos cuatro a cinco años mientras que América latina será responsable del 16% de la producción de cacao a nivel mundial, es decir, 666.000 toneladas de las 4,1 millones que se producen en el mundo (International Cocoa Organization, ICCO, 2011/2012)

Tabla 5.- Productores y producción de granos de cacao; (cifras en miles de toneladas)

	2009/10		2010/11		2011/12	
África	2486		3225		2891	
<i>Camerún</i>	209		229		210	
<i>Costa de Marfil</i>	1242	68.4%	1511	74.8%	1476	71.4%
<i>Ghana</i>	632		1025		879	
<i>Nigeria</i>	235		240		220	
<i>Otros</i>	168		221		107	
América	516				527			531
<i>Brasil</i>	161	14.2%	200	12.2%	220	13.1%
<i>Ecuador</i>	150		161		190	
<i>Otros</i>	205		201		220	
Asia/Oceanía	633		527		351	
<i>Indonesia</i>	550	17.4%	440	12.2%	450	13.1%
<i>Papúa Nueva Guinea</i>	39		48		45	
<i>Otros</i>	44		39		36	
Total	3636	100.0%	4313	100.0%	4052	100.0%

La ampliación reciente de la capacidad de elaboración en los países productores de cacao, especialmente en África e Indonesia, se está traduciendo en un aumento del volumen de moliendas en origen, a 1,716 millones de toneladas (aumento de 116.000 toneladas o más del 7%), cifra que representa casi el 44% de las moliendas mundiales en 2011/2012.

Debido a la elevada incertidumbre respecto al suministro de cacao en grano, se apreció una mayor volatilidad de los precios durante el período del 2012 (Tabla 6). Esto se vio reflejado en la variedad de opiniones expresadas por los participantes crediticios respecto al entorno macroeconómico y a las perspectivas para la oferta y demanda en el mercado del cacao.

Tabla 6.- Precios anuales del grano de cacao.

Periodo	Promedio
	\$US/Tonelada
2006/7	1854
2007/8	2516
2008/9	2599
2009/10	3246
2010/11	3105
2011/12	2396

El impulso a la alza del precio del grano se vio frenado por la falta de resolución de la crisis de la deuda en Europa, y por la amplia oferta desde los principales países productores. Después, los precios siguieron una tónica más volátil, reflejando más que nada el impacto de las condiciones atmosféricas, la fuerza del dólar estadounidense y la noticia de unas moliendas inferiores a lo esperado en los mercados maduros.

1.3.2 Producción de cacao en México

A pesar de la historia que persigue al cacao; México no figura entre los principales productores del grano; sólo tres son los estados que dominan la producción nacional del cacao: Tabasco, Chiapas y Oaxaca; dando una producción anual de 27 600 toneladas de *Theobroma cacao*, registrado en el año del 2012 (SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2014).

El estado de Tabasco contribuye con 67% de la producción en el país. La región productora del estado de Tabasco se encuentra distribuida en diez municipios (Tabla 7) siendo Jalapa, el municipio con mayor rendimiento en la cosecha de cacao (0.82 ton/ha).

La cosecha de cacao se realiza prácticamente durante todo el año, destacando la que se inicia en septiembre y termina en febrero del año siguiente, debe realizarse con una frecuencia de 8 a 10 días para obtener un grado de madurez uniforme y evitar pérdidas por sobre maduración.

Tabla 7.- Municipios productores de cacao en el estado de Tabasco.

	Superficie Sembrada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(ha)	(ton)	(ton/ha)	(\$/ton)	(Miles de Pesos)
 Comalcalco	11,055.00	5,205.00	0.47	38,306.63	199,386.01
Cunduacán	8,511.00	4,030.90	0.47	38,436.10	154,932.06
Cárdenas	10,342.00	4,401.90	0.43	38,063.79	167,553.01
Huimanguillo	5,671.00	2,504.00	0.44	36,984.82	92,610.00
Jalapa	3	2.47	0.82	42,016.19	103.78
Jalpa de Méndez	2,830.00	1,219.00	0.43	38,511.90	46,946.01
Nacajuca	37	15.8	0.43	37,012.66	584.8
Paraíso	1,583.00	674	0.43	39,495.55	26,620.00
Tacotalpa	158.26	122.87	0.78	40,720.35	5,003.31
Teapa	268.96	173	0.64	37,622.43	6,508.68

El estado de Tabasco reporta en el año 2012 una producción de 18, 550 toneladas de cacao.

Chiapas, presenta cuatro regiones agroeconómicas potenciales en la producción de cacao: Soconusco, Norte, Centro y Selva Palenque; reuniéndose 28 municipios participantes en la producción de *Theobroma cacao* (Tabla 8); reportando un cierre anual de 9, 080 toneladas de grano de cacao.

En los últimos años los productores de cacao se han enfrentado a una serie de dificultades que han limitado su desarrollo, destacándose; los altos costos de cultivo, bajos rendimientos, presencia de enfermedades, falta de capital para el acopio, infraestructura de acopio deterioradas por falta de mantenimiento y la excesiva influencia de intermediarios en la comercialización, estos factores en su conjunto propiciaron que los productores perdieran el interés para una adecuada atención a sus parcelas de cacao (Comité Estatal Sistema Producto Cacao en Chiapas, CESPCC, 2012).

Actualmente existe un programa de apoyo a cacaoteros: El Programa Trópico Húmedo, que impulsa la instalación y renovación de plantíos de cacao en los estados de Guerrero, Veracruz, Oaxaca, Quintana Roo y Nayarit.

Tabla 8.- Municipios productores de cacao en el estado de Chiapas.



	Superficie Sembrada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Acacoyagua	260.7	90	0.35	29,991.18	2,699.21
Acapetahua	715.5	300	0.42	29,826.85	8,948.06
Escuintla	125	48.4	0.39	29,542.36	1,429.85
Huehuetán	2,565.00	1,282.00	0.5	33,309.34	42,702.57
Ixtacomitán	455	163.91	0.37	38,500.00	6,310.54
Ixtapangajoya	160	61.05	0.4	38,500.00	2,350.42
Juárez	1,925.00	926.1	0.49	38,500.00	35,654.85
Mapastepec	274	115	0.42	29,729.18	3,418.86
Maravilla Tenejapa	477	262.35	0.55	24,000.00	6,296.40
Mazatán	215	92.5	0.43	27,122.26	2,508.81
Ostuacán	1,805.00	834.25	0.47	38,500.00	32,118.62
Pichucalco	3,244.00	1,218.28	0.38	38,500.00	46,903.78

Continuación de Tabla 8.

Salto de Agua	760	311.6	0.41	20,750.00	6,465.70
Suchiate	331.7	222.2	0.67	31,534.47	7,006.96
Sunuapa	386	185.5	0.5	38,500.00	7,141.75
Tapachula	1,370.00	600	0.44	30,022.83	18,013.70
Tecpatán	622	249.42	0.4	40,450.00	10,089.04
Tuxtla Chico	1,041.00	418.3	0.4	28,985.51	12,124.64
Tuzantán	2,397.00	1,150.56	0.48	32,476.61	37,366.29
Villa Comaltitlán	335	166	0.5	31,800.00	5,278.80

1.4 Historia

Theobroma cacao tuvo suma importancia simbólica, social, religiosa, política y sobre todo económica en las culturas del México prehispánico.

Su consumo estaba celosamente reservado a los grandes señores, guerreros y comerciantes; abarcaba un estatus verdaderamente valioso tanto en la medicina tradicional como en tratos comerciales; el cacao era un emblema de poder.

Es bien sabido que en el imperio azteca, Moctezuma recibía parte de sus tributos en almendras de cacao. Es así que la semilla de cacao es reconocida históricamente como moneda en el mundo Azteca (Attolini L., 2011); sin embargo, hay registros históricos sobre el inicio del apogeo de esta semilla en toda la historia de Mesoamérica, en donde el cacao o <<kakawa²>> ha vivido en la cultura prehispánica desde 1500 a.C. con la primera civilización de América: los olmecas.

² Palabra reconstruida por lingüistas del vocablo mixezoqueano, de la familia lingüística cuyas lenguas adscritas son habladas en el istmo de Tehuantepec, la sierra de Juárez y el occidente de Chiapas.

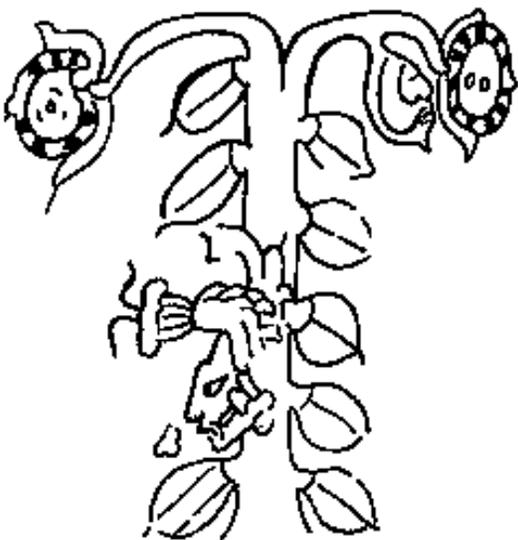


Figura 4.- Detalle de un vaso clásico maya; la cabeza del Dios del maíz pende de un árbol de cacao.

FUENTE: Karl Taube, 1993.

Los mixezoqueanos eran los portadores de una cultura derivada de los Olmecas, ubicados en una extensa llanura denominada Izapan en Chiapas, justo en medio de lo que llegaría a ser la más rica provincia productora de cacao del Xoconochco (palabra nahua que los españoles corrompieron a Soconusco) (Coe, 2013). Para engrandecer la relevancia del cacao en la Historia, la gran obra poética de los mayas, el *Popol Vuh*, cuenta que los hijos gemelos de los creadores del Universo son decapitados en

Xibalbá, el inframundo maya, una de las cabezas cortadas perteneciente al Dios del maíz (Figura 4) es colgada en un árbol de jícaras, que en verso maya es representado como un cacaotero (Recinos, 2005)

El cacao aparece en el libro sagrado como parte de la canasta básica del sustento del pueblo, no como la semilla tan importante que llegaría a ser; probablemente ninguna otra nación del pasado de nuestro país haya sido tan conocida en la historia de la evolución del cacao como la Azteca, en donde el grano para preparar *yom cacao*³ en la cultura maya, ahora sería símbolo de grandeza y sello de la nobleza azteca.

Para los antiguos mexicanos, el cacao no sólo era apreciado por su sabor o por el valor económico, sino también por su fuerte significado simbólico. El Cacahuacuáuhuitl (Árbol de Cacao de los Aztecas) representó un papel preponderante en la cosmovisión náhuatl, al representar una de las cuatro direcciones cósmicas, estando colocado al sur de la plataforma universal (Figura 5-1).

³ Del lenguaje maya, que significa espuma de chocolate.

En el códice Fejérvary-Mayer; el árbol de cacao forma parte de un diagrama cósmico; es el árbol del Sur, la dirección de la Tierra de los Muertos, asociada con el color rojo, el color de la sangre: a un lado del árbol se encuentra Mictlantecuhtli, Señor del Inframundo (Coe, 2013). En ese sentido, se le asociaba al corazón humano, ya que para ellos, el corazón y el cacao contenían líquidos preciosos, uno la sangre y el otro el chocolate.

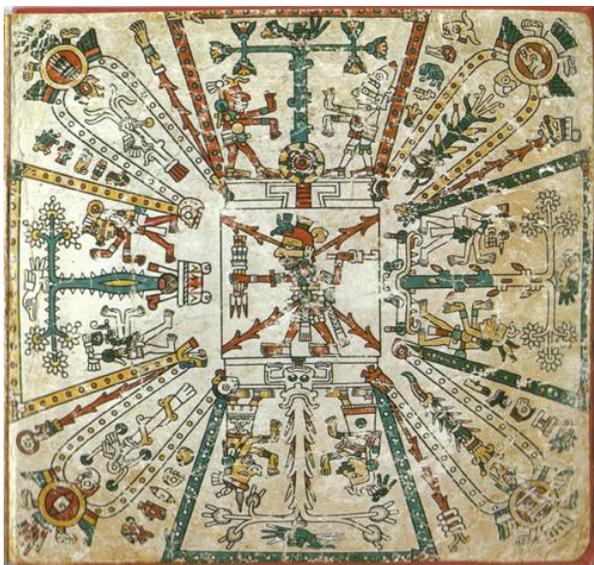


Figura 5.- Árbol de cacao; detalle Pochteca. (Códice Fejérvary-Mayer)

1.4.1 Orígenes del cacao

En torno al cacao existen algunas incógnitas, que tienen que ver con la delgada línea entre la leyenda y la historia. No se conoce exactamente su origen, algunos autores señalan que fue en Ecuador bajo el imperio de los incas y otros que fue la cultura Azteca la precursora del grano y su implementación, no sólo en la alimentación sino en toda la base económica del imperio prehispánico; pero como se ha explicado anteriormente, el término cacao - o mejor dicho *kakawa* - tiene una historia mucho más profunda y fueron los olmecas los precursores de la semilla y los mayas, la base que enseñó al Viejo Mundo cómo beber chocolate.

El origen del cacao, así como su nombre; es una de las leyendas más sobresalientes en la historia del México antiguo.

En la mitología prehispánica existían dos dioses vinculados al cacao: **Ek- Chuah**, de origen maya; y **Quetzalcóatl**, de origen azteca (Figura 6); que dieron a los hombres la fortuna de cosechar el grano para deleite y prosperidad del pueblo.



Figura 6.- Ek-Chuah (izquierda), dios maya del cacao y Quetzalcóatl (derecha), dios azteca del Cacao.

Tezcatlipoca Blanco, Señor del Este, conocido por el nombre de Quetzalcóatl, la Serpiente Emplumada; enseñó a los hombres el arte de la agricultura, la astronomía, la medicina y las artes plásticas, rey sagrado de los toltecas, pueblo que precedió a los Aztecas en la historia de Centroamérica; era el dios que odiaba la guerra y se oponía a los sacrificios. A diferencia de Tezcatlipoca Negro, Señor del cielo y la tierra, Señor de la Oscuridad; estos dioses son dualidad y antagónicos; Tezcatlipoca Blanco y Tezcatlipoca Negro son creadores del mundo (Martínez, 1975)

Cuenta la leyenda...

Quetzalcóatl, Dios bondadoso, Señor del Viento Este; descendió un día con los Toltecas haciéndoles hermosos regalos, los hizo dueños del maíz y del frijol y emplearon sus horas en estudiar convirtiéndose en grandes arquitectos, magníficos escultores y finos trabajadores de artesanías.

Quetzalcóatl amaba tanto a los hombres que decidió darles uno de los tesoros más grandes que guardaban los cuatro dioses que ponían en movimiento al Universo.

*Entre ellos Tezcatlipoca Negro, Señor del Viento Norte, que tras desterrar a Quetzalcóatl por haber entregado tan valioso tesoro señorial, asesinó a su esposa Itzqueye (Diosa Madre) por no revelar el lugar en dónde estaba escondido el tesoro de la ciudad. La sangre de la princesa fertilizó la tierra y allí nació el **Cacahuacuáhuítl**. Quetzalcóatl sustrajo el arbusto de hojas rojas; pidió a Tláloc que alimentara la planta con la lluvia y a Xochiquetzal que la adornada con sus flores; con el tiempo este arbusto sagrado dio vida. El fruto era amargo como el sufrimiento padecido por la princesa Itzqueye, fuerte como había sido ella ante la adversidad y oscuro como la sangre derramada.*

Los hombres fueron instruidos para recoger los granos, tostarlos y molerlos. La pasta obtenida fue mezclada con agua, miel y chile en jícaras, obteniendo así una bebida extremadamente fuerte en sabor, espesa y picante conocida como << Xocoatl ⁴>>.

El obsequio despertó la furia de los Dioses tras saber que los hombres estaban tomando una bebida sólo destinada para ellos y planearon venganza contra Tezcatlipoca Blanco.

Un día Quetzalcóatl recibió una bebida que le prometía olvidar sus penas; quedando totalmente ebrio por aquel líquido, el Dios Bondadoso quedó ridiculizado ante el pueblo y con suma vergüenza, Quetzalcóatl se marchó. Una vez estando en Neonalco ⁵ arrojó unas últimas semillas del Cacahuacuáhuítl que florecieron bajo su mano y juró regresar.

(Gobierno de Veracruz; Dirección de promoción. , 2012)

⁴ Del náhuatl *xococ* (agrio) y *átl* (agua). Perfil: sabor fuerte, amargo, cargada en materia grasa; caracterizada por proveer de gran energía y vitalidad.

⁵ Hoy el estado de Tabasco.

Tras la cosmogonía prehispánica y la opulencia que representa la cultura de Mesoamérica, había otro nivel de referencia simbólica al cacao y el chocolate. La realeza azteca tenía alto estima y devoción por las artes, especialmente hablando de la poesía, el Rey Poeta de Texcoco dejó como herencia más de un poema que expresa la conciencia de la vida; uno de ellos relacionado con el *Xochicacáhuatl* o Chocolate Florido, una metáfora que deja claro que todos perecemos en esta tierra. Para cerrar con broche de oro el recorrido vertiginoso del cacao en la cultura del México antiguo, se cita una canción de Nezahualcóyotl:

*Bebamos ahora,
comamos ahora
Cacao Florido:
con él deleitémonos
que ya sus corolas
abrieron sus flores.*

*El cacao Florido
embriaga mi corazón,
embriaga mi corazón.
Con él ande yo adornado
y de igual modo pueda ir mi corazón [...]*

1.4.2 Conquista del cacao

Después de la llegada de los españoles en el S. XVI, se comenzaron a realizar distintas variantes de la bebida de *Xocoatl*, donde incursionó el azúcar junto con otros ingredientes surgiendo variantes en la bebida destinada hasta entonces sólo para la nobleza.

Tras el viaje de *Theobroma cacao* al Viejo Mundo y los diversos motines realizados por bucaneros piratas, el grano de cacao fue dándose a conocer en las mesas de la alta alcurnia española en donde el arte para obtener *yom cacao*⁶ vertiendo la bebida de una *xicalli*⁷ a otra, fue reemplazado técnicamente por el “*moliniani*”⁸ mejor conocido como molinillo.

⁶ Ya mencionado anteriormente; del lenguaje maya, que significa espuma de chocolate.

⁷ Xicalli: (del náhuatl) jícara.

⁸ Moliniani (molinia): algo que se mueve o se agita.

La bebida de chocolate viajó cual “teléfono descompuesto” en todo el mundo: Italia en donde el chocolate fue preparado con las más finas especias barrocas, entre ellas la más popular y celosamente cuidada: el jazmín; Francia, donde surgió la Chocolatière (Figura 7) utensilio empleado en la cocina aristócrata para servir la bebida exótica traída del Nueva España; Inglaterra, en donde en un principio, los temidos piratas fueron ignorantes del valor del grano hasta que los ingleses arrebataron a España la isla de Jamaica en 1655.



Figura 7.- Chocolatière de plata del S. XVIII.

A medida que se produjeron cambios en el consumo del grano de cacao, el consumo per cápita de chocolate se disparó; esto fue de la mano con el aumento en el consumo de azúcar, ya que el nuevo destino de ese chocolate ahora sólido fue la fabricación de golosinas y postres.

Fue hasta el año de 1828 cuando se inició la industrialización del chocolate; en ese año, el químico holandés Coenraad Johannes Van Houten (Figura 8) inventó y patentó el proceso de desgrasado y alcalinización del cacao (Ver apartado 1.5.5)



Figura 8.- (Izquierda a derecha) Químico holandés Coenraad Van Houten (1801-1887), inventor del desgrasado y alcalinización del licor de cacao. Máquina hidráulica de desengrasado (1828). Anuncios de productos Van Houten (Cacao-Cocoa).

El desgrasado consistía en una prensa hidráulica en donde la pasta obtenida de la molienda del cacao tostado – industrialmente llamada licor de cacao – era reducida del 53% al 27% de materia grasa (manteca de cacao), dejando una torta que podía ser pulverizada muy fácilmente, esa torta son los sólidos de cacao o mejor dicho, la cocoa. La invención de Van Houten hizo posible la fabricación en gran escala de chocolate para las masas, lo mismo sólido que en polvo (Coe, 2013). Gracias a la demanda en rápido crecimiento de la nueva golosina, el precio de la manteca de cacao –hasta nuestros días la materia prima de mayor valor en la formulación de chocolate- se disparó, siendo la cocoa de más fácil acceso para la población y dejando al chocolate sólido sólo para la élite del siglo XVIII; la Revolución Industrial así como la producción masiva de esta novedosa invención, conduciría al chocolate a las manos de cualquier glotón ansioso por disfrutar “*tlaquetzalli*”⁹ ya muy lejos de ceremonias y rituales que merece el *kakawa*.

De los personajes más famosos en la industria del chocolate están (Figura 9): Francis Fry (1767-1835), John Cadbury (1801-1889), F. Louis Cailler (1796-1852), Henri Nestlé (1814-1890) quien gracias al descubrimiento de evaporación aplicada a la leche, ésta pudo formar parte de una de las formulaciones de chocolate más amada en la industria confitera: el chocolate con leche; Rudolphe Lindt (1855-1909) máxima expresión de la calidad en el chocolate hasta nuestros días gracias al perfeccionamiento realizado en la concha (Ver apartado 2.3.2) y el más conocido en el mundo del chocolate: Milton Snavely Hershey (1857-1945), quien llevó la industria del chocolate a la producción en masa (Coe, 2013).

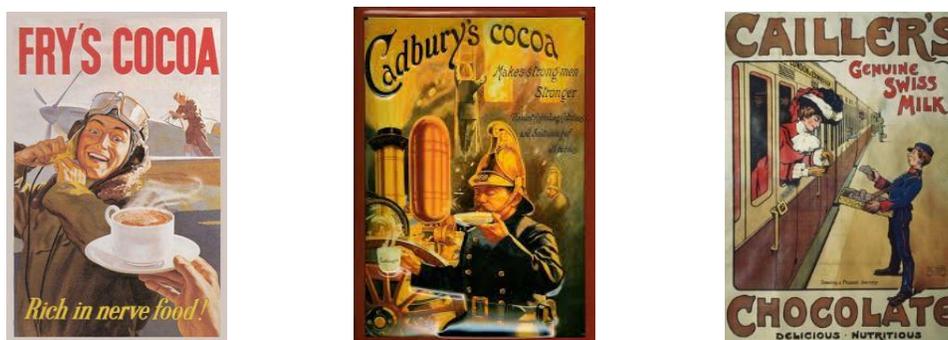


Figura 9- Publicidad de los pioneros en la industria del Chocolate. El producto era considerado un placer solo para adultos; fue Nestlé el primero en incorporar el chocolate como golosina para niños.

⁹ Tlaquetzalli: chocolate de alta calidad entre los aztecas; significa “cosa preciosa”.

1.5 Transformación industrial del cacao

Se entiende por materia prima esencial a los granos de *Theobroma cacao* para la elaboración de chocolate, que son sometidos a procesos de transformación que dan lugar a cambios fisicoquímicos necesarios para la impartición de las propiedades como aroma y color en el grano destinados a la elaboración de un producto de calidad.

1.5.1 Cosecha

Los árboles de cacao florecen dos veces al año, siendo el principal periodo de floración en junio y julio; el periodo de maduración de los frutos oscila entre los cuatro y los seis meses, según la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura donde se encuentre la plantación. Así la primera cosecha se concentra en los meses de octubre, noviembre y diciembre, y la segunda durante marzo y abril.

Las mazorcas de cacao son cosechadas una vez maduras; este estado está relacionado con el cambio de color externo según la variedad de cacao de la que se hable (Figura 10), esta operación es realizada manualmente; los frutos defectuosos o enfermos son destruidos y enterrados en el campo; los frutos sanos son abiertos para extraer las semillas y ser trasladadas a la etapa de fermentación. Cada mazorca contiene alrededor de 30 a 40 semillas y presentan una humedad de 65% estando recubiertas de una pulpa azucarada y mucilaginososa (Andrade, 2011)



Figura 10.- Cambios de coloración durante la maduración del fruto de cacao (izq.) mazorca abierta donde se exponen los granos de cacao recubiertos (der.)

1.5.2 Fermentación

Tras la recolección de las mazorcas y la extracción de las semillas de cacao, los granos frescos se convierten en un producto comercial por medio de cuatro operaciones principales: fermentación, secado, clasificación y almacenamiento; en este apartado se describe el proceso de fermentación.

La fermentación es el proceso por medio del cual se da la formación de las sustancias precursoras del sabor y aroma de chocolate; se limpian las semillas, se mata el embrión y se da buena presentación a las almendras. Como ya se mencionó en el apartado anterior, los granos de cacao se encuentran recubiertos de una pulpa rica en azúcares y muy pegajosa; esta capa interna es muy propensa a la degradación favorecida por las temperaturas tropicales de las zonas de producción (Beckett S. T., 2008).

La fermentación consiste en colocar las semillas frescas en contenedores acondicionados para que la pulpa tras la sudoración y el desarrollo de bacterias y levaduras drene correctamente admitiendo la penetración de aire entre las semillas; existen zonas productoras en África donde la fermentación es realizada en el suelo (Figura 11), colocando las semillas con pulpa recién obtenidas de la mazorca entre hojas de plátano.



Figura 11.- (Arriba) Técnicas de fermentación empleadas en regiones de producción africanas, primer acomodo de hojas de plátano (Abajo) Granos de cacao frescos.

Esta etapa, es iniciada por la conversión de los azúcares presentes en la pulpa a alcohol etílico mediante la acción de levaduras; posteriormente las bacterias oxidan el etanol a ácido acético y finalmente a dióxido de carbono y agua con la presencia del aumento de temperatura de 10°C a 40°C para una primera etapa de fermentación activa durante 24 horas; los siguientes dos días hay producción de ácido láctico llegando a una temperatura de 50°C y un pH ácido de 4-5; el proceso de fermentación se lleva a cabo de 5 a 7 días para el forastero y 2 días para el cacao criollo (Beckett S. T., 2008).

Es importante la aireación y el drenado de las semillas para tener así las condiciones óptimas para las reacciones oxidativas involucradas con la actividad microbiana, lo que se ve reflejado en la elevación de la temperatura asegurando la fermentación en toda la cosecha.

El desarrollo del sabor en la etapa de fermentación es responsabilidad de las células del cotiledón o el grano, donde se almacenan la grasa y la proteína; y más específicamente las células de pigmento que contienen los ya mencionados alcaloides: teobromina y cafeína.

1.5.3 Secado

El secado del cacao es el proceso durante el cual el grano consigue pasar de 55 % de humedad hasta 6 - 8 %. Durante este tiempo las almendras de cacao terminan los cambios para obtener el sabor y aroma a chocolate. También se producen cambios en el color, apareciendo el color típico marrón del cacao fermentado y secado correctamente (Figura 12).

Esta operación puede realizarse de dos formas:

- a) Secado natural
- b) Secado artificial

En el secado natural el cacao es expuesto al sol sobre mantas, petates o incluso el suelo, en donde el grano es constantemente volteado para generalizar el secado en todo el lote expuesto.

En el caso de las regiones en donde no existe un adecuado periodo de sol, el cacao se seca con el método artificial, exponiéndose el grano a estufas colocadas debajo de las mesas en donde se coloca el grano fermentado; este método reduce la calidad del grano ya que es expuesto a temperaturas mayores y es un proceso acelerado que llega a dañar el lote y contaminarlo con el humo de la fuente de calor.



Figura 12.- (Arriba) Método natural de secado, el cacao es colocado en el suelo sobre yute o madera. (Abajo) Método artificial de secado, el cacao es colocado sobre placas de calentamiento. FUENTE: INIFAP, 2011

Muchas de las condiciones de las zonas productoras de cacao tienen pocas facilidades para el mantenimiento del grano libre de contaminación y las inclemencias del clima que ocasionan defectos en el grano, esto hace que su producción tenga menos demanda y por consiguiente los precios son más bajos.

1.5.4 Clasificación y almacenamiento del grano

Una vez los granos secos y con una humedad menor a 7% se sigue una selección de los mismos donde se elimina toda partícula ajena al producto.

En México, el control de calidad es con respecto a la Norma Mexicana 352 (NMX-F-352-S-1980) de Cacao en grano fermentado; en esta norma se especifica el desarrollo del muestreo y la verificación de las especificaciones que debe cumplir un lote comercial de cacao. La NMX-F-272; Granos de cacao – Prueba de corte -, establece el procedimiento establecido como un estándar internacional para la clasificación y aceptación del cacao, ésta consiste en tomar una muestra representativa del lote de 100 granos por lo menos y cortarlos a lo largo para revelar la sección con la mayor cantidad de la parte media de los cotiledones (Figura 13) con ello el grado ideal de fermentación es cuando la ésta prueba de calidad resulta con el 70-80% de granos completamente fermentados; es decir, se separan perfectamente tras el corte y el 30-20% parcialmente pardas o púrpuras (Gobierno Reginoal Piura, 2007), los granos menos fermentados son de color gris y deben estar ausentes o en una cantidad menor al 5%. Se pueden detectar más imperfecciones en el grano fermentado, éstas son enlistadas en la Tabla 9.



Figura 13.- (Arriba) Granos de cacao sometidos a prueba de corte. (Abajo) Granos de cacao con fermentación adecuada aprobados por prueba de corte NMX-F-272.

Tabla 9.- Defectos del grano de cacao fermentado y su descripción.

Defecto	Descripción
<i>Pacha</i>	Grano que carece de cotiledones o que son demasiado delgados.
<i>Daño por insectos</i>	Grano cuyas partes se encuentran infestadas por insectos en cualquier etapa de desarrollo o perforaciones.
<i>Hongo</i>	Grano con presencia de hongos a simple vista.
<i>Pizarroso</i>	Grano con color blanquecino.
<i>Violáceo</i>	Grano cuya fermentación no fue completa.
<i>Otros</i>	Granos rotos, materia extraña.



Granos de cacao pizarrosos



Pacha



Daño por insectos

El cacao en grano fermentado es clasificado de acuerdo con el número de granos defectuosos que arroje el control de calidad aplicado al grano fermentado y con el porcentaje de imperfecciones en un kilogramo; en México existen dos clasificaciones:

- i. Cacao fermentado clase México 1
- ii. Cacao fermentado clase Calidad Inferior (CI)

Los granos son transportados y almacenados en sacos de yute o cáñamo; los sacos de cacao en grano fermentado, deben almacenarse en locales adecuados, aislados de otros productos que afecten su calidad y estibarse sobre tarimas de madera que los levanten no menos de 20 cm sobre el nivel del piso, conservando no menos de 60 cm entre cada estiba e igual distancia entre las estibas y la pared a una temperatura de 12 a 13 °C.

1.5.5 Procesamiento del grano

El producto principal en la industria cacaotera es el licor de cacao o pasta de cacao; ésta es la materia prima de mayor provecho para la inclusión de *Theobroma cacao* en la industria no sólo confitera, también farmacéutica.

En la Figura 14, se encuentran ilustradas las principales operaciones a las que se somete el grano de cacao descritas en este capítulo.

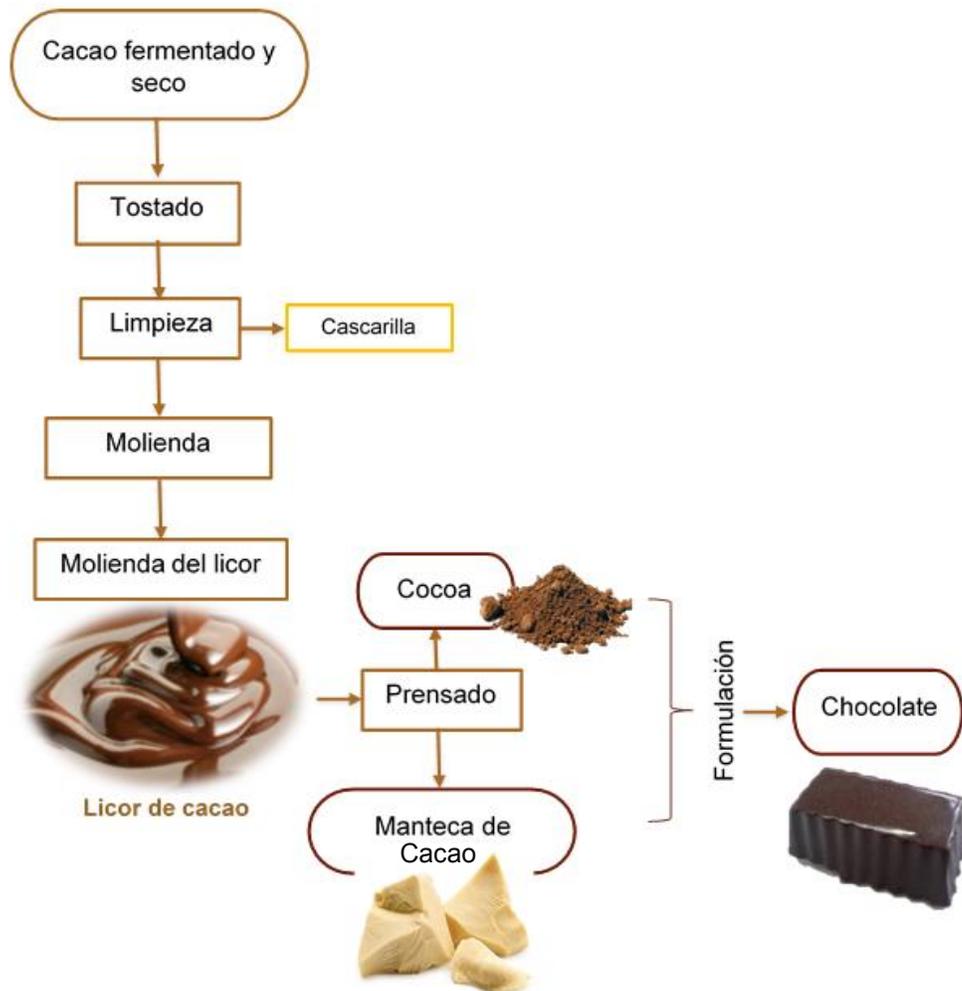


Figura 14.- Proceso de transformación de grano de cacao fermentado y seco.

Tostado

Con el fin de desarrollar los precursores químicos que realmente constituyen el sabor a chocolate, es realizada la operación de tostado; es en esta etapa en donde la humedad residual en el grano es disminuida del 7% a 2.5%. Las condiciones normales a las que se realiza el tostado son 110 a 140°C según la variedad del grano, durante un tiempo de 45 minutos a una hora (Beckett S. , 1994).

Durante el tostado existe una problemática que altera la calidad y sobre todo la homogeneidad de las características esperadas en el lote de cacao sometido a tueste: el tamaño del grano.

Al tener un lote en el cual por naturaleza los granos presentan un tamaño variado, las condiciones de tostado como tiempo y temperatura puede afectar tanto la integridad del grano más pequeño como la falta de tueste en grano más grande; en la Figura 15 se representa la dificultad que la variedad de tamaños significa, ocasionando que los granos de menor tamaño se tuesten demasiado mientras que los grandes no llegan al grado de tueste ideal en el centro de sí.

Todo lo anterior significa que no se logra la transformación de los precursores de sabor deseados, resultando un sabor menos prominente en el licor obtenido de ese lote trabajado.



Figura 15.- Efecto del tamaño del grano en el grado de tostado.

Con el fin de solucionar estos conflictos organolépticos de la materia prima durante el tostado, existen tres métodos de tostado. En el primero, se realiza un tostado previo del grano y un tostado posterior a la limpieza del mismo, mientras que en los otros dos métodos el grano es sometido a temperaturas de tueste por más de una ocasión. Durante esta etapa se generan los sabores astringentes y amargos en el grano, así como una disminución de acidez en el sabor del grano de cacao que el grano fermentado.

Las principales transformaciones químicas presentes en durante el tostado son las reacciones de Maillard y reacciones de caramelización (Tabla 10); estas son importantes en la percepción sensorial ya que son las responsables de la generación de precursores para propiedades de color y sabor característicos del licor de cacao destinado a la industria chocolatera. En general, las reacciones de Maillard son responsables de los mejoramientos en las propiedades sensoriales de los alimentos como aroma, textura, sabor y color.

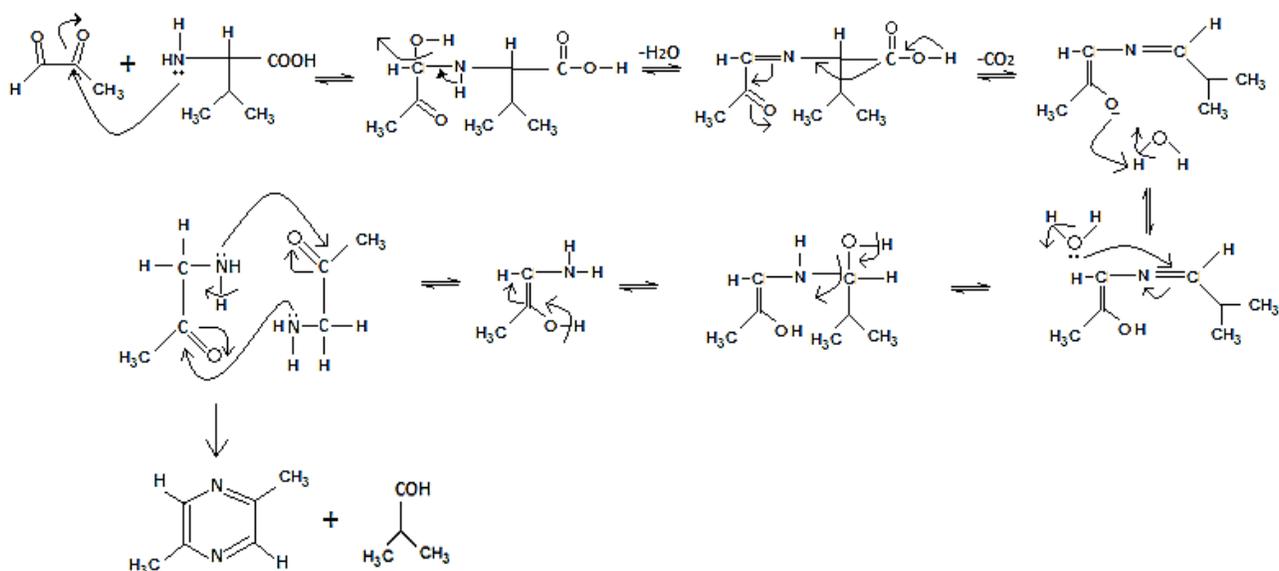
Tabla 10.- Aromas generados por reacción de glucosa y un aminoácido

Aminoácido	Aroma generado a temperatura:	
	100 °C	180 °C
Valina	Pan de centeno	Chocolate fuerte
Leucina	Chocolate dulce	Queso quemado
Prolina	Proteína quemada	Pan
Glutamina	Chocolate	Caramelo
Ácido Aspártico	Azúcar	Caramelo
Lisina	Ninguno	Pan

La importancia de la interacción entre los aminoácidos y la glucosa en las reacciones de Maillard es vital, estos dos sustratos son esenciales para la generación de compuestos participantes en el perfil de sabor del cacao y por ende del chocolate. Algunas de las sustancias más importantes son pirazinas, pirroles, piridinas, imidazoles, tiazoles y oxazoles.

Una interacción importante dentro del esquema de reacciones de Maillard, es la degradación de aminoácidos, llamada degradación de Strecker. Las altas concentraciones de precursores obtenidos de la degradación de Strecker, hacen de los productos de cacao una abundante fuente de pirazinas, por lo menos 80, las cuales desempeñan un papel importante en el sabor del chocolate

Como ejemplo, se analiza la estructura de una pirazina. Si se parte del piruvaldehído y la valina a una temperatura de 180°C, los productos finales serán 2-metil-propanal y 2,5-dimetil-pirazina cuyo sabor ha sido descrito como chocolate intenso (Reacción 1).



Reacción 1.- Obtención de 2,5-dimetil-pirazina y 2-metil-propanal a partir de valina y piruvaldehído, compuesto obtenido por la fragmentación de un carbohidrato durante las reacciones de Maillard. Dichos productos son característicos del aroma a chocolate.

La concentración de pirazinas en los granos de cacao tostados es dependiente de la variedad del grano; por ejemplo, lotes producidos en Ghana han reportado un contenido de 698 microgramos por cada 100g de grano tostado, mientras que lotes provenientes de Tabasco han presentado un contenido de 142 microgramos de pirazinas en 100g de grano tostado (Reineccius, 1972) (Beckett S. T., 2008); gracias a estas variaciones identificadas el establecimiento del sabor final del chocolate está asentado en las concentraciones de pirazina tras las condiciones del proceso de tostado.

En la Tabla 11, se enlistan algunos de los productos encontrados en el cacao; dentro de esas sustancias, la concentración de isovaleraldehído (producto de la valina) y de isobutiraldehído (de la leucina) se correlaciona con la evaluación de calidad del sabor.

Tabla 11.- Productos de degradación de aminoácidos presentes en productos de cacao.

Productos de degradación			
Aminoácido	Amina	Aldehído	Ácido
Alanina	Etilamina	Acetaldehído	Ácido acético
Valina	Isobutilamina	3-metilbutanal	2-metilpropanoico
Leucina	Isoamilamina	Isovaleraldehído	3-metilbutanoico
Isoleucina		2-metilbutanal	
Treonina		Isobutiraldehído	
Fenilalanina	2-fenetilamina		2-fenilacético
Tirisina			
Metionina		Metional	

Con la cantidad de sustancias encontradas en el chocolate, entre aldehídos obtenidos a partir de aminoácidos y la degradación de los mismos, es lógico encontrar un perfil tan complejo en el producto final.

Descascarillado

El descascarillado (también conocido como aventado) es el proceso mediante el cual se separa la cáscara y parte del germen del resto del grano (Figura 16). Es deseable que el grano se mantenga en trozos grandes, de manera que la separación de la cáscara sea relativamente sencilla. Los granos de cacao rotos por manipulación son seleccionados por tamizado.

La cascarilla es un material fibroso mientras que el grano de cacao es muchísimo más denso y esférico, así cuando el grano tostado es sometido a la vibración del tamizado, la cáscara es retirada del grano; la cascarilla es eliminada por inyección de aire desde el inferior, dejando el grano de cacao tostado y limpio listo para el procesado posterior: la molienda.



Figura 16.- (Izq. a der.) Grano de cacao fermentado y seco, tostado y descascarillado.

Molienda y prensado

La molturación o molienda del grano de cacao tiene por objetivos principales hacer que las partículas de sólidos de cacao sean lo suficientemente pequeñas para fabricar un chocolate de correcta palatabilidad y lograr la extracción de la mayor cantidad posible de manteca de cacao de las células del grano. Por mucho, la propiedad física más importante de las partículas para la elaboración de chocolate, es el tamaño de las mismas; es un punto crítico para más de una característica en el producto final como apariencia, adsorción de la manteca de cacao y su distribución, influyentes en la sensación en boca al consumir chocolate (Beckett S. , 1994) (Minifie, 1980).

La grasa extraída es necesaria para facilitar el flujo del chocolate y para este caso, la obtención de la mayor cantidad de manteca de cacao es desde el punto de vista económico, un factor necesario. En general, la finalidad de la molienda es recubrir las partículas sólidas de cacao con la grasa liberada mediante la ruptura de las células del cotiledón obteniendo un producto fluido conocido como pasta o licor de cacao.

Es necesario moler el grano hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 5 mm a 30 micrómetros (Beckett S. T., 2008); debido a que la mayoría de las máquinas de molturación hacen una reducción de tamaño de partícula en un rango más amplio, es necesario realizar al menos dos etapas de molienda; la primera, una molienda de impacto y finalmente una molienda fina.

El licor de cacao puede ser destinado a la fabricación de chocolate directamente o, industrialmente es sometido a una operación más que da como resultado la separación del material sólido y la manteca de cacao: prensado. La manteca de cacao de mayor calidad es obtenida mediante el prensado del licor de cacao; ésta operación consiste en una serie de compartimentos con tamiz de acero inoxidable en donde el licor a una temperatura de 90 a 100 °C es presionado por un émbolo que trabaja a una presión de 40 a 50 MPa.

Al material “desengrasado” obtenido al final del prensado se le conoce como torta prensada de cacao; industrialmente llamada cocoa, una vez pulverizada contiene un 10% como mínimo de manteca de cacao y un máximo de 24%, dependiendo del tipo de cocoa en polvo que se produzca.

:-: Capítulo 2 :-:

CHOCOLATE

2.1 Definición de chocolate

La Norma Oficial Mexicana 186-SSA1/SCFI del 2002 define al chocolate como el producto elaborado a partir de la mezcla de dos o más de los siguientes ingredientes: licor de cacao, manteca de cacao, cocoa, azúcar o edulcorantes; así como de otros ingredientes opcionales, tales como productos lácteos y aditivos alimentarios, encontrándose dentro de éste diferentes variedades.

2.2 Chocolate amargo

Existe una amplia denominación comercial en la industria chocolatera, cada uno de ellos está elaborado bajo factores esenciales de composición (Tabla 12) que cubren los distintos gustos y exigencias del consumidor, dejando en sus manos una diversidad de presentaciones.

Tabla 12.- Composición %m/m en base seca de algunos tipo de chocolate.

Producto	Manteca de cacao total	Sólidos totales de cacao	Grasa butírica total	Sólidos totales de leche
Chocolate amargo	22.0	40.0		
Chocolate semiamargo	15.6	30.0		
Chocolate con leche	20.0	25.0	2.5	14.0
Chocolate con alto contenido de leche	17.0	20.0	5.0	20.0
Chocolate con leche descremada	20.0	20.0	0.5	14.0
Chocolate blanco	20.0	20.0	3.5	14.0
Chocolate para mesa	11.0	20.0		

Según la formulación de cada uno de los tipos de chocolates da propiedades particulares de color y sabor, que aunados a las propiedades intrínsecas del lote de cacao empleado da como resultado un producto único.

El chocolate amargo también es conocido comercialmente como chocolate oscuro o negro. Esta elaborado con un mínimo de 40% de sólidos de cacao; existen chocolates amargos hasta con un 85% de cacao (denominado Brut) siendo éstos de un sabor mucho más fuerte y comúnmente empleados en repostería; existen los extra amargos, con un contenido de cacao del 75 al 80%, la cantidad máxima para que el producto pueda considerarse agradable al paladar.

2.3 Elaboración de chocolate amargo

Como se pudo apreciar en la Tabla 12, el chocolate amargo está compuesto por la mezcla de tres ingredientes básicos; dos de ellos sólidos (cocoa y azúcar) que deberán ser recubiertos por la manteca de cacao (Figura 17) para formar una matriz fluida a la temperatura de proceso.

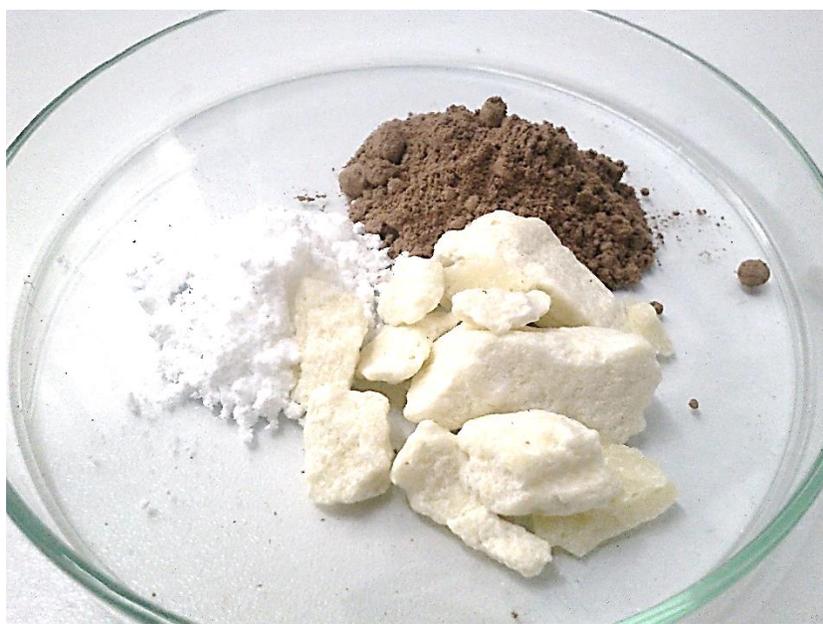


Figura 17.- Ingredientes base para la formulación de chocolate amargo.

2.3.1 Ingredientes

Manteca de cacao

Es el producto semisólido de aspecto graso a temperatura ambiente (25°C), de color ligeramente amarillento, obtenido por el procesamiento de las semillas del árbol *Theobroma cacao* tras el prensado del licor de cacao (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, SCFI, 2007). La manteca de cacao es el ingrediente responsable de conferir fluidez al chocolate durante la línea de producción, ésta se funde a una temperatura de 35°C; es por ello que el producto final expuesto a temperaturas ambiente de 25-26°C se encuentra en estado sólido.

La manteca de cacao está compuesta principalmente de ácido oleico y esteárico (ambos de cadenas de dieciocho carbonos); también se encuentran el ácido palmítico (dieciséis carbonos) y en menor cantidad el ácido linolénico y mirístico (Tabla 13). Este ingrediente es responsable de las características de dureza y textura en el producto, es decir, su reacomodo tras ser solidificado dará pauta a las propiedades fisicoquímicas del producto final.

Tabla 13.- Composición %m/m de la manteca de cacao

Ácido graso	Mínimo	Máximo
Ácido mirístico C14:0	-	0.1
Ácido palmítico C16:0	25	27
Ácido esteárico C18:0	31	37
Ácido oleico C18:1	31	35
Ácido linolénico C18:2	2.8	4.0
Ácido linolénico C18:3	-	0.1
Ácido araquídico C20:0	0.2	1.0

Cuando el producto es enfriado, los triglicéridos se someten a una transformación líquido-sólido que forma cristales primarios; esto es conocido como polimorfismo (Lina Svanberga, 2011).

Dichos cristales se agregan a través de calor y el proceso de transferencia de masa a agregados de cristales mucho más largos, este proceso de agregación continúa hasta una red tridimensional que influye fuertemente en el comportamiento mecánico de la mezcla en proceso de ser una barra de chocolate.

Además, las determinadas condiciones de tratamiento durante la cristalización o enfriamiento, pueden influir en cada nivel de la estructura final formada y esto, a su vez, afectará las propiedades macroscópicas como brillo en la superficie lo que repercute en los criterios de calidad evaluados en el chocolate.

En las formulaciones de chocolate se admite la participación de grasas distintas a la proveniente del grano de cacao en un 5% máximo, principalmente la grasa vegetal, aunque se han empleado distintas mezclas que repercuten en la temperatura de fusión del producto final.

Cocoa

Es el producto que se obtiene de la molienda y pulverización de la torta de cacao parcialmente desengrasada, de color propio de las variedades de cacao y de la técnica de proceso empleada, la cual pudo o no haber sido tratada por alcalinización. La alcalinización es el tratamiento químico aplicado a la cocoa para proporcionar a las partículas mejores propiedades de suspensión para su utilización en bebidas; es también conocido como proceso holandés.

Con la amplia gama de coloración, la cocoa es un ingrediente muy codiciado, que se puede utilizar de formas muy variadas en la industria de los alimentos, desde la elaboración de recubrimientos, rellenos, preparaciones prefabricadas para pastelería, polvos para bebidas y confitería (Ramírez Gómez, 2011).

Azúcar

Es el disacárido cristalizado, de sabor dulce, que se extrae de la caña de azúcar y la remolacha azucarera; químicamente conocido como sacarosa; está conformada por los monosacáridos glucosa y fructosa (Figura 18).

La fabricación de la pasta de chocolate está basada en la utilización de azúcar de finura media, es decir de 25 a 50 micrómetros; estas partículas sólidas también se verán rodeadas de grasa dando el gusto dulce suave a la formulación de chocolate amargo.

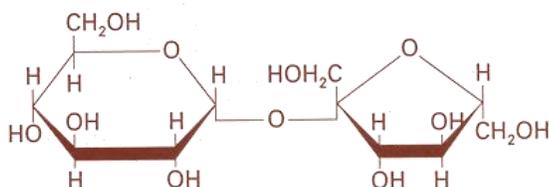


Figura 18.- Molécula de sacarosa. Glucosa (izq.) y Fructosa (der.).

2.3.2 Proceso de elaboración de chocolate amargo

En esta sección se describirán las etapas del proceso involucradas en la elaboración de chocolate amargo desde el mezclado hasta la selección de empaque para su distribución en el mercado (Figura 19) (Afoakwa E. O., 2007).

Refinación.-

El objetivo de este proceso es reducir el tamaño de partícula, asegurar que el chocolate no presente partículas que le confieran una textura arenosa; idealmente debe existir una distribución por debajo de 50 micrómetros. Esta operación consiste en moler la pasta de cacao obtenida de la mezcla de los ingredientes repetidas veces en un refinador de cinco rodillos. Esta etapa influye fuertemente en la viscosidad de la mezcla durante la línea de producción.

Conchado.-

Durante esta operación se presentan procesos físicos y químicos que no pueden ser tratados por separado; la función principal de esta operación es el completo desarrollo del sabor a chocolate y la conversión de la pasta granulosa inicial de la mezcla de los ingredientes en una suspensión fluida de azúcar y cocoa en una fase líquida de manteca de cacao.



Figura 19.- Descripción de las operaciones unitarias para elaboración de chocolate.
(Beckett S. , 1994)

Los procesos que se iniciaron en la fermentación y el tostado son completados en la concha, todas las características del producto final varían en función de los tiempos y temperaturas de cada una de las etapas que comprenden la operación de conchado.

Durante el conchado se ejercen fuerzas de compresión y de cizalla que separan los glóbulos formados durante la trituración o molienda, la separación ocasiona una disponibilidad mayor de partículas unitarias de grasa así como el redondeo de las mismas por abrasión, logrando dispersarlas por toda la matriz de la mezcla.

Se necesita la acción continuada de amasado que aporte alto esfuerzo cortante, utilización de flujos de retroceso y división mecánica que implica rodear las partículas sólidas de manteca de cacao permanentemente.

La operación de conchado consiste en tres etapas:

Fase seca: existe una operación de cizalla constante, es aquí donde se elimina la humedad de la mezcla así como sustancias volátiles indeseadas en el perfil sensorial del producto.

Fase plástica: se desarrolla el sabor por medio del corte de partículas y el calentamiento, existe una homogenización del licor de cacao con la manteca adicional existente en la formulación.

Fase líquida: consiste en una homogenización por agitación intensa, es en esta etapa donde se incorpora el aditivo alimentario mejorador de la fluidez.

Temperado.-

Antes de moldear el chocolate, éste debe ser temperado. Esta operación se fundamenta en la precrystalización parcial de la manteca de cacao, es decir, la cantidad de partículas sólidas aumenta ligeramente y con ello la viscosidad.

Con el temperado, los triglicéridos presentes en la manteca de cacao cristalizan en tres formas polimórficas diferentes: α , β y β' (Figura 20). La información completa de las formas polimórficas formadas durante el temperado sólo pueden ser obtenidas por análisis de rayos X de monocristales (Beckett S. , 1994).

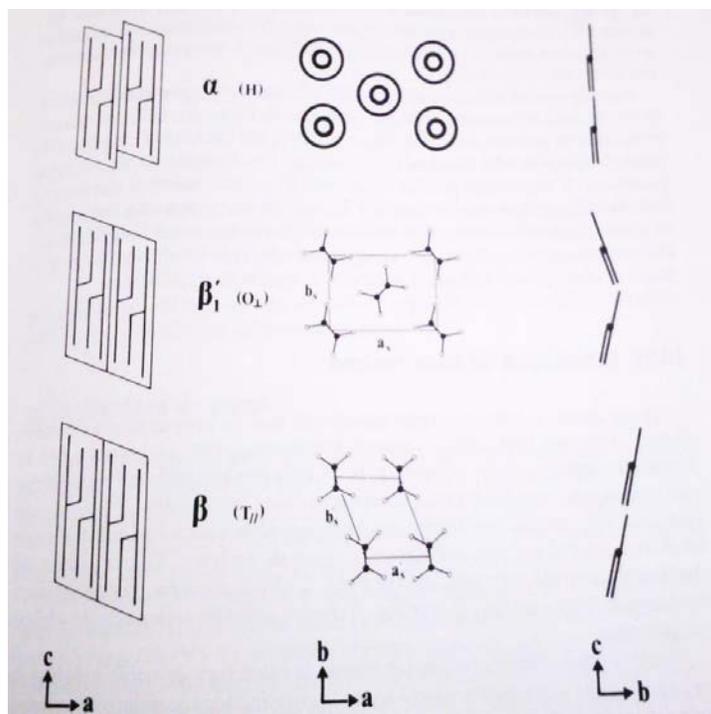


Figura 20.- Orientación esquemática de los propuestos dímeros de triglicéridos de las formas polimórficas.

El polimorfismo es la habilidad de las moléculas para cristalizar en un número diferente de configuraciones de cristales. Es así que el temperado es la forma de asegurar que la manteca de cacao y los equivalentes de ésta, cristalice de forma adecuada y en forma estable. Esta etapa del proceso de elaboración de chocolate es de suma importancia para las características visuales del producto, como son brillo, color y resistencia térmica (Lina Svanberga, 2011).

En un chocolate comercial existen seis diferentes cristales (I, II, III, IV, V y VI), en donde el V proporciona al producto las condiciones necesarias para su venta, evitando fenómenos como la migración de la grasa a la superficie del producto (Fat Bloom) que da al chocolate una apariencia blancuzca y opaca (Tabla 14).

La fusión completa del chocolate, el enfriamiento hasta el punto de cristalización, cristalización y la fusión de cristales inestables son las etapas que comprenden el temperado adecuado del chocolate.

Tabla 14.- Formas polimórficas de la manteca de cacao. (Becket, S.; 1994)

Willie & Lutton (Confitería)	Larsson (Grasas y aceites)	Punto de fusión (°C)	Arreglo de la cadena.
Forma I	β' 2	16-18	Doble
Forma II	α	21-22	
Forma III	Mezcla	25.5	
Forma IV	β' 1	27-29	
Forma V	β 2	34-35	Triple
Forma VI	β 1	36	

Moldeado y envasado.-

Esta es la fase final de la elaboración de un chocolate, es aquí donde se producen piezas con tamaños precisos. Con el fin de enfriar y solidificar el producto, éste es expuesto a una temperatura de 4°C en túneles de enfriamiento. Al desmoldar se revela un brillo intenso en la superficie del chocolate listo para empacar y comercializar.

Debe existir un control en las temperaturas de solidificación ya que puede dar lugar la aparición de problemas durante el moldeado. En primer lugar puede provocar que la grasa solidifique en una forma cristalina incorrecta, esto causaría que el producto final presente una apariencia blancuzca (conocida como Fat Bloom) prematuro y que el chocolate no se contraiga adecuadamente, lo que ocasiona una dificultad en el desmolde de las piezas.

En segundo lugar, la humedad del aire podría condensar en la superficie fría y gotear en el chocolate, provocando una apariencia polvosa (Sugar Bloom) debido al azúcar que se disolvió en las gotas de agua y que se cristalizó después del envasado.

Como es de esperar en un producto que ha existido relativamente durante tantos años, las exigencias de empaquetado de chocolate son sencillas. El objetivo principal del empaque es proteger el producto del manejo, suciedad e infestación de insectos, así como de la humedad.

La hoja de aluminio (empaque primario) es el material más empleado en la envoltura de los chocolates así como una banda de papel o faja (empaque secundario) donde se imprime la información nutrimental y empresarial del producto, como marca, nombre y logotipo, por mencionar lo más visual (Beckett S. T., 2008).

El etiquetado de los productos alimenticios está establecido por la NOM 051-SCFI/SSA1-2010 de etiquetado de alimentos y bebidas no alcohólicas, esta norma establece los criterios a cubrir en una etiqueta, desde la expresión de contenido neto, porciones en envase, contenido energético e ingredientes hasta información fiscal de la empresa que lo elabora, fecha de caducidad y el distintivo logotipo que propone el área de mercadotecnia.

El empaque terciario, consiste generalmente en el empaquetado de cierto número de piezas en una caja de cartón corrugado; la cantidad suele estar en el orden de dos a seis docenas de chocolate. Para la mayoría de los mercados, se coloca en un embalaje de cartón corrugado un determinado número de cajas, este es considerado el envase cuaternario; de esta forma se pueden colocar varias cajas, unas, junto a otras y envolverlas en película transparente contráctil para facilitar el manejo.

Lo descrito anteriormente es el envasado tradicional, sin embargo existen otras técnicas de envasado como los pellets, envoltura continua, caja termoformada con papel tipo glassine y la envoltura por torsión.

:-: Capítulo 3 :-:

REOLOGÍA EN ALIMENTOS

La reología es la ciencia de los materiales que da pauta a numerosos campos de aplicación; desde mecánica de sólidos, polímeros y estructura de materiales, cosméticos, bioingenierías y muy ampliamente en el área de alimentos.

La industria chocolatera está estructurada en procesos con equipos de flujo; además de ser estrictamente una línea de producción con parámetros controlados como temperaturas y tiempos, la influencia de la interacción de los insumos involucrados en la formulación (como la manteca de cacao, la presencia de los sólidos de cacao y de azúcar y determinados ingredientes funcionales) son una prioridad para la evaluación de la eficiencia de producción y características del producto final. Es por ello que el análisis reológico del alimento permite obtener información cualitativa y cuantitativa muy valiosa para la comprensión de la naturaleza mecánica de la materia en estudio: el chocolate.

3.1 Definición de Reología

La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de los materiales, bajo la influencia de fuerzas mecánicas; esta ciencia es una rama de la física que estudia, en general, la viscosidad, plasticidad, elasticidad y el flujo de la materia. Las propiedades reológicas de un material se determinan por aplicación de las leyes básicas de la Mecánica; por ende, dado que la reología es la ciencia del estudio de la deformación de la materia, es importante entender los conceptos de esfuerzo y deformación (Steffe, 1992).

Dicho de otra forma; la reología se puede definir como el estudio de la relación entre el esfuerzo y deformación; tales relaciones fundamentales son llamadas *relaciones constitutivas*. En materiales complejos estas ecuaciones incluyen variables como tiempo, temperatura y presión.

Un módulo está definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación; mientras que la viscosidad está definida como la relación entre el esfuerzo y la rapidez de deformación (Steffe, 1992). La viscosidad es descrita a fondo posteriormente.

Esfuerzo y deformación

El esfuerzo es definido como la intensidad de las fuerzas internas distribuidas que resisten un cambio en la forma del cuerpo al que aplican; en otras palabras, el esfuerzo está definido en términos de fuerza por unidad de área expresado en pascales. Existen tres tipos de esfuerzo: tensivo, compresivo y corte (TA Instruments, 2004)

La deformación se define como el cambio de forma de un cuerpo debido al esfuerzo (aunque existen más causas de deformación en un cuerpo o material como un cambio térmico); la deformación se considera un cambio lineal y se mide en unidades de longitud (Steffe, 1992). En reología, la deformación es descrita de manera más sencilla por la *deformación simple de cizalla* o mejor conocida como *deformación cortante*.

En base a lo anterior la deformación va acompañada de un esfuerzo. (Figura 21)

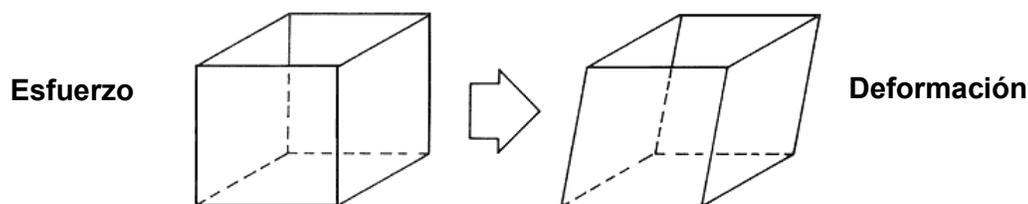


Figura 21.- Diagrama de la deformación típica de un cuerpo por aplicación de un esfuerzo.

Comportamiento de sólidos

La reología está delimitada por los sólidos y por los fluidos y existe una relación específica esfuerzo-deformación, que es una función única del material. En términos reológicos la característica principal de los sólidos es la elasticidad, es decir, al deformarse el cuerpo es capaz de almacenar energía y al ser retirada la fuerza externa que ocasiona la deformación, el sólido es capaz de devolver la energía recuperando sus dimensiones originales.

Comportamiento de líquidos

En el caso de los fluidos, los líquidos fluirán bajo influencia de una fuerza externa, pierden energía en forma de calor debido a la fricción molecular interna por ende existe una deformación permanente. Los materiales reales; como lo es el chocolate, que presentan un comportamiento entre estos dos extremos, son denominados materiales viscoelásticos; es decir, al recibir una fuerza externa presentan tanto la componente elástica típica de un sólido como la componente viscosa principal de los líquidos. Para describir el flujo relativo de partículas se conocen dos modelos: flujo extensional y flujo cortante. El flujo extensional presenta un movimiento en donde los elementos presentes se desplazan hacia o alejándose uno del otro; mientras que en el flujo cortante, los elementos se desplazan sobre o por debajo uno de otro siendo un movimiento continuo de partículas de un líquido que puede ser visualizado en capas alternadas deslizándose (Figura 22).

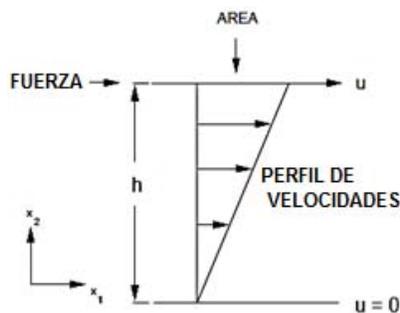


Figura 22.- Perfil de velocidades entre placas paralelas.

La velocidad entre capas en el flujo cortante se incrementa se linealmente con respecto a la capa anterior desplazada, de modo que las capas más alejadas de la superficie estacionaria se mueven más rápidamente que las capas más cercanas a ella.

El gradiente de velocidad en la dirección de ángulos rectos al flujo, se denomina << rapidez de corte [$\dot{\gamma}$] >> también conocido como <<rapidez de deformación >>; la fuerza por unidad de área producida por el flujo es llamada << esfuerzo cortante >>. (Figura 23)

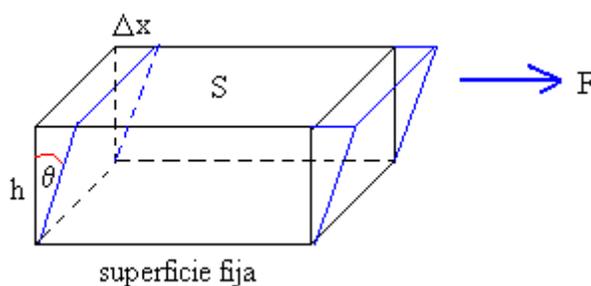


Figura 23.- Diagrama de definición de flujo cortante.

La menor área es estacionaria y el plato superior se desplaza linealmente con un valor igual a δx . Cada elemento está sujeto al mismo nivel de deformación por lo tanto el tamaño del mismo no es relevante (Bird, 1986).

Las ecuaciones más comunes para la definición del flujo cortante son:

$$\tau = F/S \quad (1)$$

$$\gamma = \Delta x/h = \text{Tan } \theta \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = F/h \quad (3)$$

Dónde: τ es esfuerzo cortante, F es fuerza, S es área, γ es deformación cortante, Δx es el desplazamiento sufrido tras la aplicación de la fuerza, h es altura, θ es el ángulo de deformación, $\dot{\gamma}$ es velocidad de deformación o velocidad de corte [s^{-1}].

El *esfuerzo cortante* (τ), es la fuerza por unidad de área aplicada paralelamente al desplazamiento y es una magnitud microscópica ya que cambia en cada punto del perfil de velocidades analizados para la elaboración de una curva representativa del comportamiento de un material.

La *velocidad de deformación* ($\dot{\gamma}$), es lo que provoca el desplazamiento ordenado de los elementos del fluido, se define como el gradiente del perfil de velocidades.

Viscosidad

Para el análisis más profundo de los fluidos, es necesario conocer el término de viscosidad. La viscosidad es la resistencia a la deformación y sólo se manifiesta en fluidos en movimiento; esta propiedad de los líquidos fue establecida por Newton. Sus unidades son pascales por segundo en el Sistema Internacional. La viscosidad puede ser afectada significativamente por factores como temperatura, presión y desde el punto de vista reológico el factor más importante es la velocidad de corte (Steffe, 1992), (Mott, 2006).

Variación con la velocidad de deformación

Desde el punto de vista de la reología, los fluidos más sencillos son los newtonianos; llamados así porque siguen la ley de Newton, que dice:

“El esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad o velocidad de corte”

Una gran cantidad de fluidos de interés industrial presenta desviaciones en la ley de Newton al ser su viscosidad una función de la velocidad de corte aplicada; esto quiere decir que a diferencia del comportamiento newtoniano, en donde la viscosidad es constante a diferentes velocidades de corte a una temperatura dada; los insumos industriales presentan un comportamiento no newtoniano, en donde la velocidad de corte hace variar la viscosidad del material.

Lo descrito anteriormente deja un amplio rango de velocidades de deformación, por lo que es importante tener en cuenta la variación que pueda sufrir la viscosidad del fluido que no siga la ley de Newton (no newtoniano) acorde a la velocidad de deformación. La Figura 24 representa comportamientos típicos alejados de la ley de Newton, dichas curvas se denominan curvas de flujo y son empleadas para la descripción reológica de los fluidos.

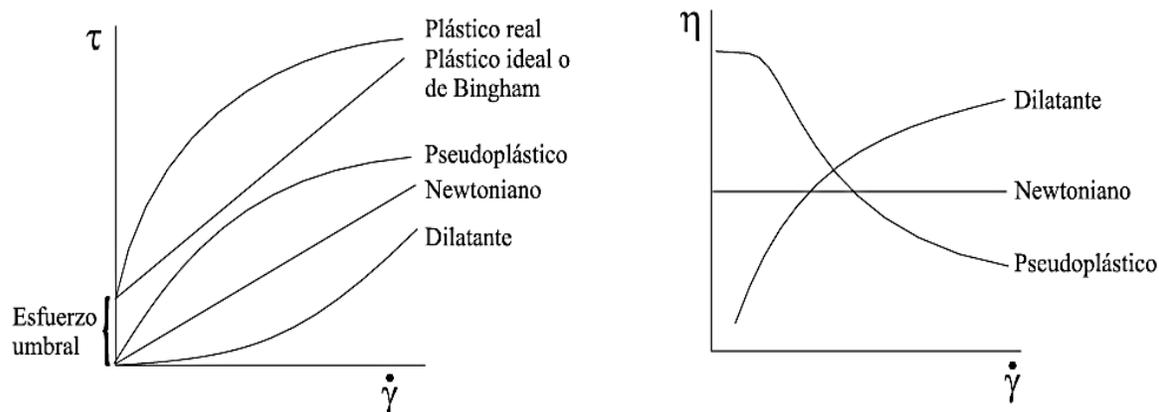


Figura 24.- Curvas de Flujo para distintos comportamientos.

τ , esfuerzo cortante; η , viscosidad; $\dot{\gamma}$ velocidad de corte o rapidez cortante.

Cabe destacar los comportamientos que a continuación se describen:

1. **Fluidos Pseudoplásticos (shear thinning):** se conocen como fluidos adelgazantes; fluyen más fácilmente al aumentar la velocidad de deformación; es decir, la viscosidad se ve disminuida. Muchos materiales muestran este tipo de comportamiento en menor o mayor grado y es el comportamiento más común. Así por ejemplo, numerosas sustancias que se encuentran en emulsiones, suspensiones o dispersiones son ejemplo de este tipo de fluidos.
2. **Fluidos dilatantes (shear thickening):** son los fluidos que ven aumentada su viscosidad al incrementarse la velocidad de deformación causado por reacomodo en su microestructura.

- 3. Fluidos plásticos:** la plasticidad es un fenómeno que muestran ciertos materiales que se comportan como sólidos elásticos, almacenando cierta energía cuando estos materiales son sometidos a esfuerzos menores a un valor umbral; si son sometidos por arriba del valor de esfuerzo umbral, se deforman continuamente como un fluido, siendo el esfuerzo una función lineal o no de la velocidad de deformación. Ejemplos de este tipo de fluidos son la mermelada y la clara de huevo.

3.1.1 Medición de los parámetros reológicos.

Los instrumentos empleados para medir las propiedades reológicas fundamentales en los fluidos y semisólidos alimenticios, se categorizan en dos: los rotacionales y los de tubo (Figura 25). Dichos instrumentos son llamados reómetros.

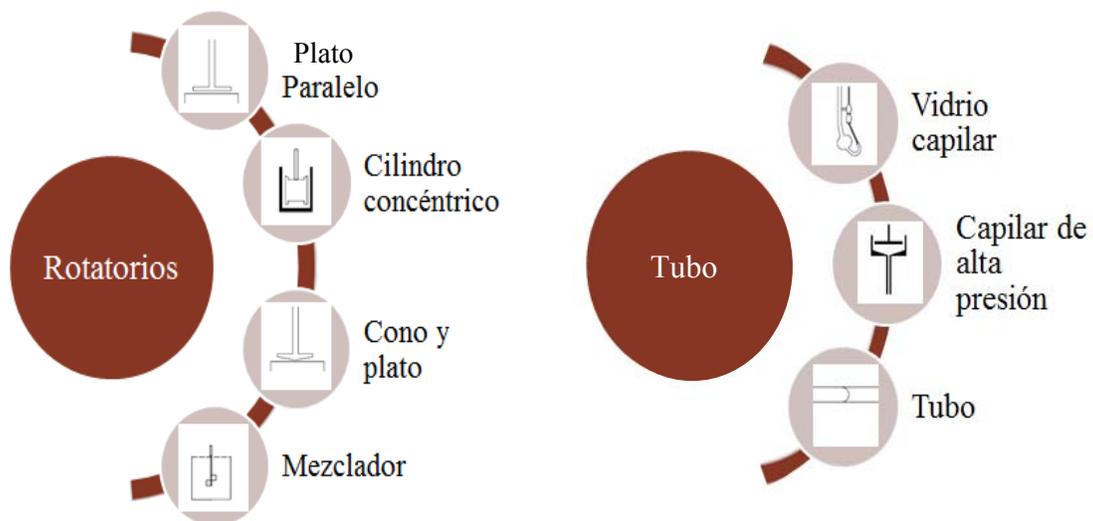


Figura 25.- División de reómetros y geometrías para mediciones reológicas comunes.
Adaptado de Steffe, J. (1996)

Los instrumentos rotatorios son operados en velocidad angular constante o en modo oscilatorio; la mayoría de estos instrumentos está basado en el control del esfuerzo facilitando la recolección de datos, análisis de materiales a bajas velocidades de corte y en la obtención del esfuerzo umbral. Dicha información es necesaria para la interpretación de la estructura interna del material analizado y para cálculos de procesos ingenieriles.

Dentro de la información que puede proporcionar el estudio de un material en el reómetro se pueden citar:

- Viscosidad: una propiedad dependiente del tiempo y la temperatura. (Ver apartado 3.1)
- Propiedades de viscoelasticidad; se evalúan los módulos (G' , G'' , $\tan \delta$) con respecto al tiempo, temperatura y frecuencia.

Elegir el reómetro junto con la geometría adecuada debe estar en función de las características de la muestra. Cuando se disponga de una variedad de geometrías y tamaños de las mismas, se debe seleccionar el diámetro de acuerdo al posible intervalo de valores de viscosidad de la muestra a analizar; por ejemplo, para el análisis de un fluido de viscosidad baja se usan geometrías de mayor diámetro, mientras que para análisis de fluidos con viscosidades altas se emplean geometrías de diámetros pequeños.

Reómetro de esfuerzo controlado

El reómetro de esfuerzo controlado (Figura 26) fija un esfuerzo de corte y mide la deformación resultante, a diferencia de otros reómetros, que controlan el desplazamiento angular y miden el esfuerzo. Esto resulta ventajoso, ya que los reómetros de este tipo son capaces de aplicar esfuerzos de cizalla muy pequeños, con lo cual pueden medir deformaciones menores (TA Instruments, 2004).



Figura 26.- Reómetro de esfuerzo controlado; TA Instruments.

Este instrumento de medición está diseñado de forma que es capaz de proporcionar una sensibilidad elevada, incluso a esfuerzos de corte muy pequeños gracias a que trabaja con un motor de torsión de inercia muy baja, así como la implementación de un cojinete de aire que asegura una transmisión del esfuerzo casi sin fricción, permitiendo medir la viscoelasticidad lineal de los fluidos (Ver sección 3.1.3).

Geometría de placas paralelas

Es la geometría empleada para el análisis de materiales con una viscosidad baja con partículas mayores a 1/10 mm de espesor, recomendable para muestras con 0.5 a 2mm de espesor y viscosidades mayores a 10 micropoise.

En dicha geometría de ensayo, la muestra a analizar es colocada entre dos platos paralelos y sometidos a corte oscilatorio (Figura 27); es decir, el tipo de carga en la cual la tensión de corte o de deformación es aplicada a la muestra de forma oscilatoria, de modo que la deformación de corte varia en amplitud alrededor de cero de manera sinusoidal (Steffe. 1992) (TA Instruments, 2004).

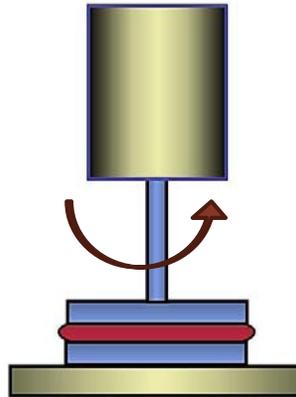


Figura 27.- Esquema de geometría de placas paralelas.

Existen principalmente tres platos que pueden figurar en la medición reológica; cada uno de ellos confiere modificaciones a las variables reológicas medidas, es decir al aumentar el tamaño del diámetro del disco se ve disminuido el esfuerzo cortante durante la prueba, mientras que la velocidad de corte aumenta; usar un plato de diámetro mayor tienen la ventaja de disminuir el espesor de la muestra (Tabla 15).

Tabla 15.- Comportamiento de parámetros reológicos según tamaño de la geometría.

Diámetro del plato		Esfuerzo cortante	Velocidad de corte	Espesor de la muestra
	20 mm	↑	↑	↓
	40 mm			
	60 mm			

3.1.2 Viscoelasticidad

La viscoelasticidad, como la palabra lo indica, es la presencia de propiedades tanto viscosas como elásticas cuando el material es deformado. Un sólido viscoelástico presenta las siguientes características:

- La deformación depende del tiempo (aún en ausencia de fuerza), la velocidad de deformación es diferente de cero.
- Las tensiones y esfuerzos dependen tanto de la deformación como de la velocidad de deformación.

Físicamente las propiedades elásticas son el resultado de desplazar ligeramente los átomos de su posición de equilibrio mientras las propiedades viscosas proceden a la difusión de átomos o moléculas en el interior del material.

Los materiales se comportan de manera lineal solo en una escala pequeña de esfuerzo o deformación, tal como lo describen Hooke y Newton.

En 1678, Robert Hooke escribió “True Theory of Elasticity”; en ésta obra, señala que el poder de cualquier resorte está en la misma proporción con la tensión de los mismos; en otras palabras, el alargamiento que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada (Ecuación 4)

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{AE} \quad (4)$$

Siendo δ el alargamiento, L la longitud, E módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal, A la sección transversal de la pieza estirada.

La ley de Hooke mencionada es aplicada a materiales elásticos hasta un límite denominado *límite elástico*; dicho límite es la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Los materiales sometidos a tensiones superiores a su límite de elasticidad tienen un comportamiento plástico, al aumentar las tensiones ejercidas el material alcanza su punto de fractura; el límite elástico marca, por tanto, el paso del campo elástico a la zona de fluencia.

En la mecánica de sólidos deformables elásticos, la distribución de tensiones es mucho más complicada que en un resorte. La deformación necesita ser descrita mediante un tensor de deformaciones (es decir, una representación algebraica que caracteriza el cambio de forma y volumen de un cuerpo); mientras que los esfuerzos internos en el material expuesto necesita ser representado por un tensor de tensiones.

En 1687, Isaac Newton abordó los líquidos y el flujo en un documento llamado "Principia"; aquí se describe claramente que la resistencia que surge de la falta de desplazamiento del líquido, en igualdad de condiciones, es proporcional a la velocidad con la que las partes del líquido se separan una de la otra.

Es así que las propiedades de un sólido ideal expuestas por Hooke y las de un líquido ideal descrita por Newton, se ven conjugadas en la viscoelasticidad de un material cotidiano y común.

Las respuestas obtenidas en las mediciones de materiales viscoelásticos son:

- Frecuencias altas (o tiempos cortos): material con características más cercanas a un sólido.
- Frecuencias bajas (o tiempos largos): material con características más cercanas a un líquido.

Los materiales viscoelásticos pueden presentar diversos comportamientos. Si el esfuerzo es constante, entonces el material se deforma de manera lineal con el tiempo; o si la deformación es constante el esfuerzo se reduce con el tiempo, lo que conlleva a una relajación.

Un parámetro utilizado para caracterizar o clasificar los materiales de acuerdo a su comportamiento elástico, viscoso o viscoelástico es el *número de Debra*, definido como:

$$De = \frac{\tau}{t} \quad (5)$$

Donde t es el tiempo característico del proceso de deformación al que se ve sometido un determinado material y τ es un tiempo característico de dicho material; el tiempo de relajación es infinito para un sólido descrito por Hooke y 0 para un líquido de Newton. De acuerdo al valor del número de Deborah, todas las sustancias se clasifican en:

$De < 1$ comportamiento líquido

$De > 1$ Comportamiento sólido

$De \approx 1$ Comportamiento semisólido

Según el concepto de Deborah todas las sustancias pueden fluir, sólo que a un tiempo específico; de esta forma, un material puede comportarse como un sólido de Hooke si tiene un tiempo de relajación muy grande o si es sometido a un proceso de deformación en un tiempo muy bajo.

3.1.3 Parámetros viscoelásticos

Los experimentos más comunes empleados, basados en la viscoelasticidad para la caracterización de materiales son los siguientes:

- **Relajación de esfuerzos**

Consiste en la aplicación de una velocidad de deformación en corte simple a la muestra analizada, mantener una determinada deformación en corte y estudiar la variación del esfuerzo de corte en función del tiempo.

- **Ensayo de fluencia**

En este caso, se mantiene constante el esfuerzo y se observa la variación de la deformación en función del tiempo.

- **Recuperación elástica**

Este tipo de experimentos consiste en la aplicación de un esfuerzo constante estudiando la deformación producida para posteriormente retirar este esfuerzo y observar la recuperación en función del tiempo.

Mientras los materiales elásticos tienen una recuperación total, los viscosos no tienen una, por ende los viscoelásticos presentan una recuperación parcial de su estado original.

- **Experimentos dinámicos u oscilatorios**

Las medidas mecánicas oscilatorias están cobrando interés debido a que permite caracterizar las propiedades viscosas y elásticas del material analizado. En este tipo de experimentos la deformación aplicada varía sinusoidalmente (Figuras 28 y 29) con el tiempo de acuerdo a lo establecido en la ecuación 6.

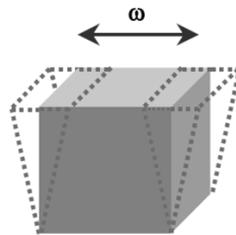


Figura 28.- Deformación oscilatoria aplicada a un cuerpo.

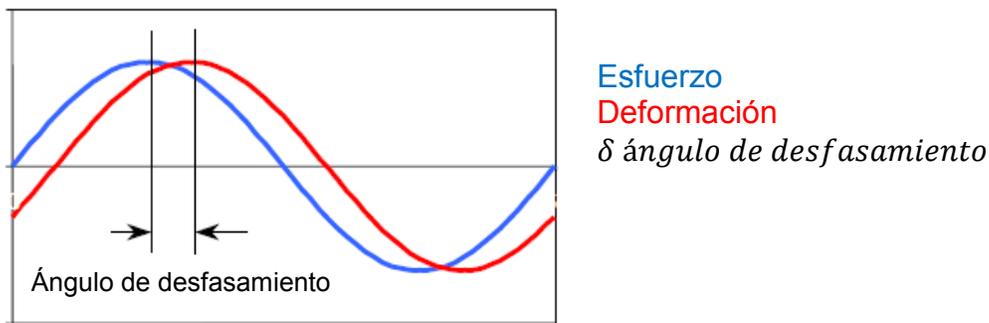


Figura 29.- Descripción de una gráfica de análisis oscilatorio.

$$\gamma = \gamma^0 \text{sen } \omega t \quad (6)$$

Mientras que el esfuerzo varía con la misma frecuencia (ω), pero presentando un desfase (δ) con respecto a la deformación (Figura 29); se obtiene así:

$$\sigma = \sigma^0 \text{sen } (\omega t + \delta) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones 6 y 7 que describen el comportamiento de la deformación y el esfuerzo cortante, es posible desarrollar la ecuación constitutiva hasta llegar a la expresión:

$$\sigma = \gamma^0 (G' \text{sen } \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (8)$$

Así, dos de los parámetros viscoelásticos son:

1. Módulo elástico o de almacenamiento [$G'(\omega)$]
2. Módulo viscoso o de pérdida [$G''(\omega)$]

El módulo de almacenamiento es el cociente entre el esfuerzo que está en fase con la deformación y la deformación. El módulo de pérdidas es el cociente entre el esfuerzo que está desfasado $\pi/2$ con la deformación y la deformación (Ecuaciones 9 y 10).

$$G' = \frac{\sigma^o}{\gamma^o} \cos\delta \quad (9)$$

$$G'' = \frac{\sigma^o}{\gamma^o} \sen\delta \quad (10)$$

Con las ecuaciones anteriores se puede definir la tangente (tan) de pérdidas δ :

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (11)$$

Donde δ representa el desfase existente entre el esfuerzo y la deformación, siendo un parámetro indicativo de la relación entre la energía disipada, la almacenada por el material y de la viscosidad del mismo:

- Si es un material elástico el esfuerzo y la deformación están en fase y $\delta \approx 0^\circ$.
- Si el material es viscoso el esfuerzo y la deformación están en desfase y $\delta \approx 90^\circ$.
- Si es un material viscoelástico δ tendrá valores entre 0 y 90°

Conociendo ya los módulos elástico y viscoso, se obtiene el módulo complejo (tercer parámetro viscoelástico); el cual es el módulo del vector obtenido como suma de las contribuciones de G' y G'' (Figura 30).

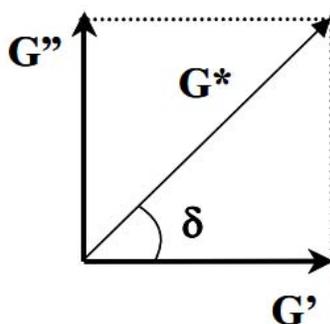


Figura 30.- Representación del Módulo Complejo como combinación de dos vectores que son los módulos elástico (G') y viscoso (G'').

3.1.4 Región Viscoelástica lineal

El dominio de la región viscoelástica lineal esta descrita cuando la deformación es pequeña en donde los arreglos moleculares no están lejos del equilibrio (TA Instruments, 2004). La respuesta mecánica es entonces un reflejo de procesos dinámicos a nivel molecular.

Las magnitudes de tensión están, como lo dicta la descripción de la región linealmente relacionados y el comportamiento de cualquier líquido está completamente descrito por una función de tiempo.

La medición de las propiedades viscoelásticas lineales ayuda a construir una brecha entre la estructura molecular y el comportamiento del material.

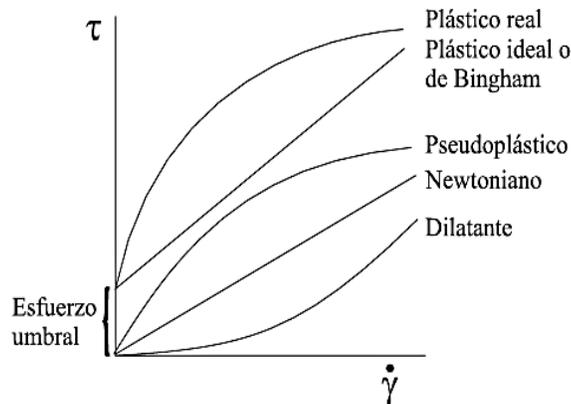
3.2 Análisis reológico del chocolate

Las propiedades reológicas del chocolate fundido tienen gran importancia en el proceso y la calidad de los productos elaborados. En diversos estudios se ha mostrado gráficamente cómo cada tipo de proceso (según el tipo de producto elaborado), el chocolate fundido debe tener determinadas propiedades reológicas (Beckett S. T., 2008). Tal conocimiento en la naturaleza reológica del chocolate o cualquier insumo empleado en su elaboración, puede significar que el sistema de control permita ahorros económicos importantes.

El chocolate fundido es una suspensión de partículas de azúcar, cacao (y si es el caso, de sólidos de leche) en una fase grasa continua. A causa de la presencia de los sólidos en la mezcla fundida, ésta no se comporta como un líquido verdadero, es decir, presenta propiedades de un líquido no newtoniano (Afoakwa E. O., 2009).

En una gráfica del esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) se puede obtener la viscosidad (η) (Gráfica 1).

En el caso del chocolate, se trata de un fluido pseudoplástico, al no considerarse el valor mínimo o el esfuerzo umbral de fuerza aplicada para ocasionar el flujo, se obtiene la llamada << viscosidad >> dependiente de la velocidad de corte.



Gráfica 1.- Diferentes tipos de reograma.

La Oficina Internacional del Cacao, Chocolate y sus productos (IOCC) acepta la descripción reológica del chocolate fundido descrito por el modelo de un líquido no newtoniano al presentar una viscosidad distinta a diferentes velocidades de corte exhibiendo un comportamiento pseudoplástico; el cálculo de los parámetros como la viscosidad (η) y el límite elástico o esfuerzo umbral son obtenidos con el modelo de Casson (Ecuación 12 y 13) (Afoakwa E. O., 2009).

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot (\dot{\gamma})^n \quad (12)$$

Casson:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{CA}} + \sqrt{\eta_{CA}} \cdot \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (13)$$

Ecuación 12 y 13.- Ecuaciones del modelo de Casson para análisis del chocolate.

Dónde:

τ , esfuerzo cortante;

τ_0 , esfuerzo umbral;

η_{pl} , viscosidad plástica;

τ_{CA} , esfuerzo cortante de Casson;

η_{CA} , viscosidad plástica de Casson;

n , índice de flujo;

$\dot{\gamma}$ Velocidad de corte;

Según la literatura y los trabajos expuestos por Stephen T. Becket, los parámetros de Casson para el chocolate oscilan entre:

$$\eta_{CA} = 1 \text{ a } 20 \text{ Pa s (10 a 200 poise)}$$

$$\tau_{CA} = 10 \text{ a } 200 \text{ Pa}$$

Como se ha estado mencionando la variación en tamaño de partícula es un parámetro importante en las propiedades de fluencia del chocolate, en concreto a umbral de fluencia.

El chocolate, requiere una fuerza considerable para empezar a fluir, pero una vez que empieza a moverse, cuando mayor sea la fuerza aplicada, más fluido se vuelve.

El umbral de fluencia alto indica una etapa estática del chocolate, es decir, el producto tenderá a no fluir, lo que es ideal para su empleo en panadería. Al hablar de un valor de umbral de fluencia bajo se puede relacionar con el empleo en trampado (cubiertas).

La viscosidad plástica se refiere a la energía necesaria para mantener el chocolate en movimiento una vez que ha empezado a fluir. Diversos factores influyen en los valores reológicos medidos, desde el contenido graso y humedad hasta el uso de aditivos alimentarios: los emulsificantes.

3.3 Propiedades de fluencia del chocolate

Las propiedades que conforman la capacidad de fluir del chocolate son importantes para la línea de producción y conforme se analicen en este apartado, también repercutirán en el juicio del consumidor.

El instrumento de medición con variables independientes es el consumidor; al comer el chocolate la mordida es la medición primaria de la dureza del producto, la temperatura de la boca (37 °C), es superior a la del punto de fusión de la manteca de cacao, de modo que al fundirse el chocolate al ser sometido a la mordida (reológicamente analizado como esfuerzo cortante) se pueden percibir otros dos factores importantes: la sedosidad del chocolate fundido al tacto de la lengua, es decir, el tamaño de partícula y el modo y tiempos en el que el chocolate recorre la boca hasta los receptores sensoriales, es decir, la viscosidad.

El recubrimiento correcto de las partículas sólidas de la formulación con la manteca de cacao, influye en las propiedades de fluencia del chocolate, ya que significa un desplazamiento adecuado de la mezcla al ser fundido en la boca y los tiempos que se emplean para desplazar los sólidos de cacao y azúcar a los receptores sensoriales, van aunados a la viscosidad.

3.3.1 Tamaño de partícula

Por mucho, la propiedad física más importante de las partículas para la elaboración de chocolate, es el tamaño de las mismas; es un punto crítico para más de una característica en el producto final como apariencia, adsorción y distribución de la manteca de cacao, sensación en boca; y para este caso, la fluidez del chocolate amargo fundido durante proceso (Do, 2011) (Beckett S. T., 2008).

Las dimensiones de las partículas están reportadas en función a un modelo de esfera equivalente en cualquier propiedad de ésta (Rawle, 2012); como volumen o masa (Figura 31).

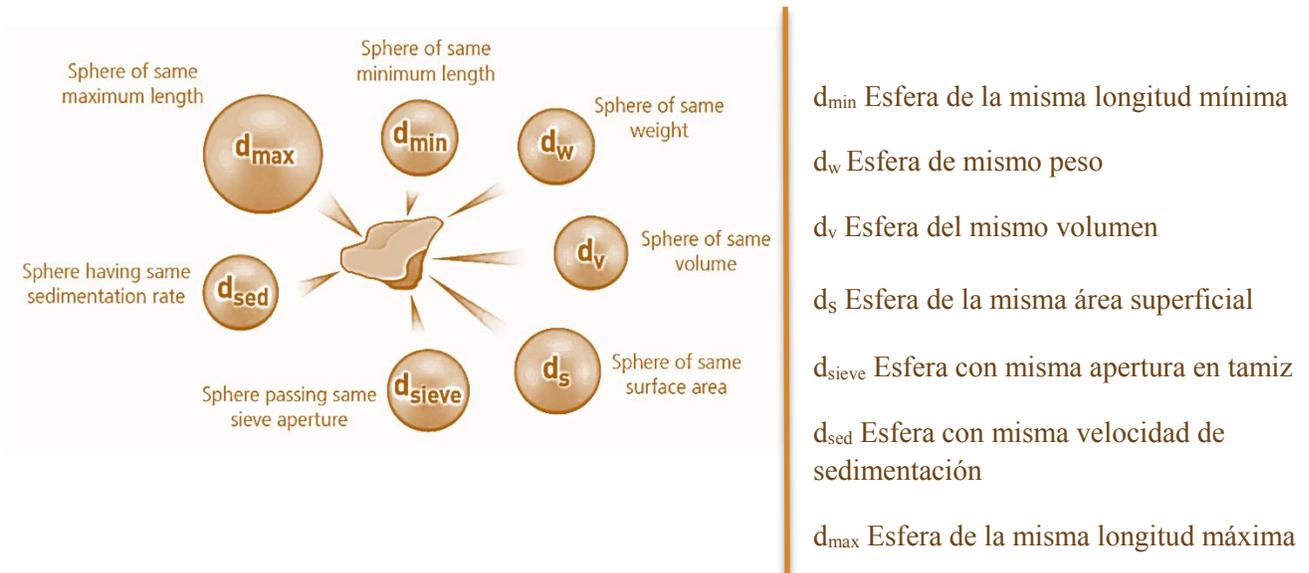


Figura 31.- Concepto de esferas equivalentes para medición de tamaño de partícula.

FUENTE: (MALVERN INSTRUMENTS , 2012)

Es importante señalar que las diferentes técnicas de medición realizadas al licor de cacao usan modelos de equivalencia de esferas diferentes y por lo tanto no siempre se reportan los mismos diámetros de partícula. Sin embargo, la morfología presentada es consecuencia del tratamiento térmico y del proceso mecánico al cual se sometió el grano de cacao: desde la molienda hasta la pulverización de la torta de prensado para la obtención de la cocoa.

Diferentes estudios han demostrado que las partículas de cocoa estándar presentan una forma irregular con pliegues en la superficie de las partículas (Figura 32).

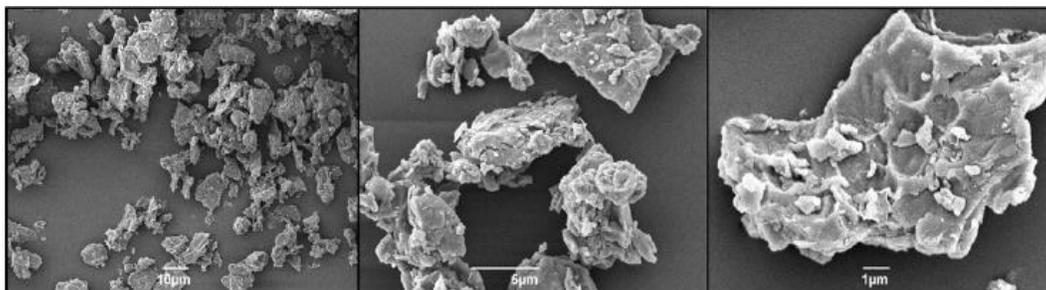


Figura 32.- Micrografías de cocoa estándar con porcentaje menor a 1% de manteca de cacao. [Do, T. –A.L., 2011.]

La industria requiere que el 90% de las partículas en el licor de cacao debe estar por debajo de un valor de 50 μm (Becket, 2008) para mejores comportamientos de fluencia, es decir: el valor de umbral de flujo, que está a su vez ligado a la distribución de las partículas en la fase grasa del chocolate. Sin embargo, licores empleados en la industria chocolatera presentan un tamaño de partícula en un rango de 50 a 100 μm .

En la línea de producción de chocolate se incluyen distintas operaciones con la finalidad de reducir el tamaño de partícula de los insumos empleados en la formulación.

Una de las operaciones con repercusión en el tamaño de partícula es el refinado, que consiste en la molienda de la mezcla de chocolate (manteca de cacao, cocoa y azúcar) antes de pasar a la etapa de conchado, operación que contribuye a la reducción del tamaño de partícula en el producto final además de inducir el recubrimiento de éstas con la manteca de cacao, que como ya se mencionó repercute directamente en la viscosidad de la mezcla tanto a nivel industrial como sensorial.

3.3.2 Humedad – tiempo de conchado

La humedad en el chocolate implica un aumento de la viscosidad muy notable, esto es debido a la presencia de la manteca de cacao como ligante principal en el licor de cacao y la mezcla de las formulaciones de chocolate.

En la industria la humedad es reducida mediante la primera etapa del proceso de conchado (fase seca), que como ya se explicó, la mezcla de licor de cacao con los demás ingredientes son expuestos a aireación y aumento de temperatura con el objetivo de eliminar la mayor parte de agua libre posible presente, durante el proceso de conchado se reduce el contenido de humedad de 1.6% a 0.6-0.8%; de modo que por cada 0.3% de humedad extra en la formulación procesada se compensa con 1% de manteca de cacao extra. Al irse eliminando la humedad se lleva consigo sabores indeseados; de esta forma se volatiliza aproximadamente el 30% de ácido acético. La humedad extra en una formulación puede provenir del azúcar, saborizantes e ingredientes extras empleados en la elaboración del producto.

En el chocolate, pueden estar presentes gotas de agua rodeadas por grasa con la ayuda de sustancias conocidas como emulsificantes, que forman una capa entre las dos fases: agua-grasa. Con los emulsificantes, la viscosidad del chocolate se ve menos afectada por la humedad.

3.3.3 Aditivos en formulación de chocolate

Los aditivos alimentarios, que ya sean naturales o sintéticos, son sustancias (o mezclas de ellas) que se agregan intencionalmente a los alimentos durante la línea de producción para lograr ciertos beneficios en el producto en el que son empleados. En la producción del chocolate, los aditivos más comunes son los emulsificantes, también llamados, emulgentes.

Los emulsificantes son sustancias que hacen posible la formación o mantenimiento de una dispersión uniforme entre dos o más materiales que son inmiscibles (Ramírez Gómez, 2011). Sus moléculas se caracterizan por presentar estructuras anfifílicas o bipolares, es decir, una parte lipófila (afín a la grasa) y una hidrófila (afín al agua), lo que permite la formación de la emulsión (Figura 33).

Entre mayor sea la proporción de la parte hidrófila, el compuesto emulsionante se disuelve mejor en medios acuosos con lo que se facilitará una emulsión aceite en agua (O/W; *oil in water por sus siglas en inglés*); si por lo contrario la parte predominante es la lipófila, podrá incorporarse más adecuadamente en medios grasos y formará una emulsión agua en aceite (W/O; *water in oil por sus siglas en inglés*).

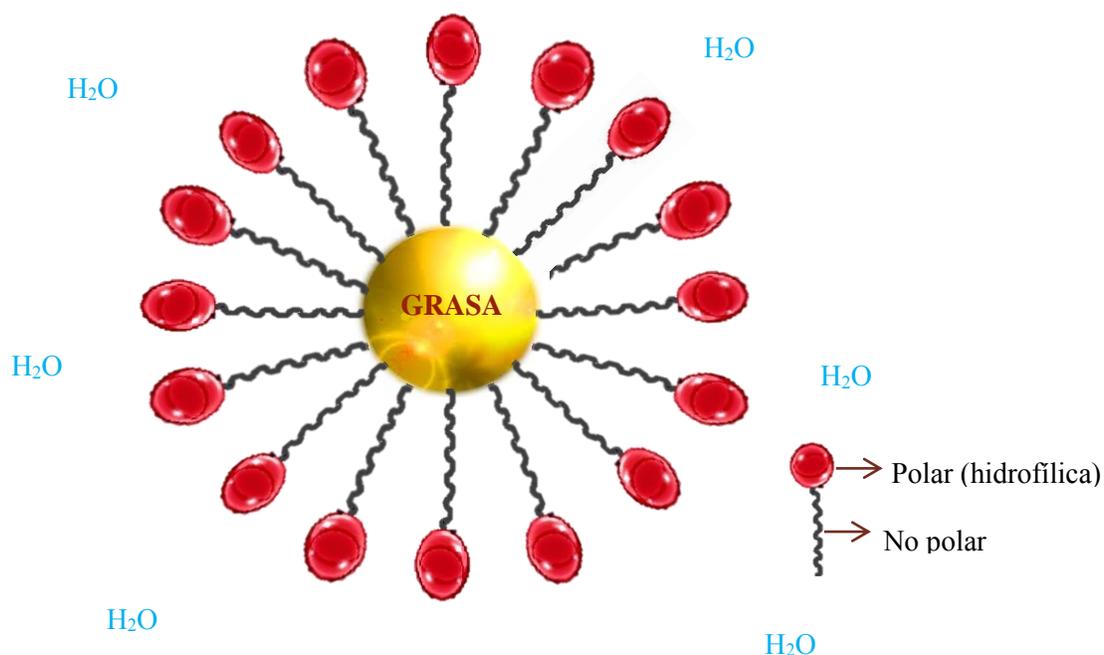


Figura 33.- Estructura del comportamiento de un emulsificante en emulsión O/W.

Como ya se mencionó en Capítulo 2, el chocolate amargo fundido a temperaturas mayores de 35°C, representa una suspensión de azúcar y sólidos de cacao en una matriz de manteca de cacao en donde no hay presencia significativa de agua; por lo que los emulsificantes actúan de manera diferente. El azúcar presente en la formulación tiene la particularidad de ser lipófobo es por ello que presenta una clara solubilidad en agua (las partículas de azúcar son hidrófilas). Para que las partículas de azúcar y de sólidos de cacao fluyan, deben estar recubiertas de grasa (Figura 34), en este caso, el emulsificante recubre la superficie de los sólidos y actúa como agente de conectivo (Beckett S. , 1994) (Schantz B. , 2005).

Los emulsificantes han sido empleados para modificar las propiedades de fluencia de los lotes de chocolate; teniendo en cuenta que las estructuras moleculares de cada uno de los aditivos empleados disminuyen la tensión superficial entre las fases continua y dispersa, afectando las propiedades intrínsecas durante las operaciones unitarias de elaboración del chocolate como sensibilidad a humedad y temperaturas de proceso.

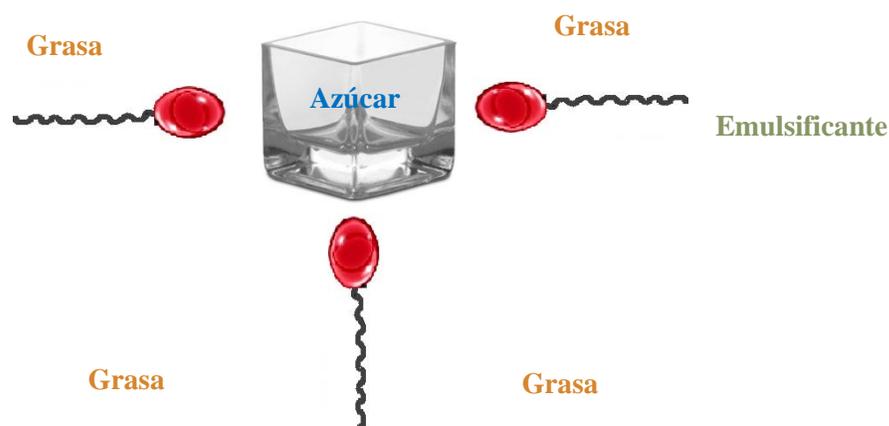


Figura 34.- Diagrama de orientación de un emulsificante alrededor de partículas de azúcar.

El papel de un emulsificante en la formulación de chocolate es actuar como el agente conectivo, por ello dichos aditivos, retardan la separación de la grasa inmediata a las partículas de agua a la superficie del producto defecto mejor conocido como *Fat Bloom* (inestabilidad fisicoquímica que presenta el chocolate tras las líneas de producción especialmente hablando de la etapa de temperado), que es identificado como la opacidad en el producto o apariencia blanquizca del mismo así, como brindar protección a la oxidación del chocolate.

Existe una amplia gama de emulsificantes utilizados en la industria entre los más comunes en la elaboración de chocolate se mencionan tres: lecitina de soya, fosfatida y poliglicerol poliricinolato.

3.3.3.1 Fosfatidos de amonio; E-442

Los fosfatidos de amonio (E-442), son otra opción en la industria chocolatera; también es conocido como emulsificante YN o fosfatida (Figura 35) y es obtenido del aceite de canola. Este aditivo se emplea en concentraciones de 0.4% a 1.0% e influye directamente en la reducción del valor de esfuerzo umbral de Casson y la viscosidad plástica del chocolate con un poder más fuerte que el conocido por la lecitina de soya (Palsgaard A/S)(Schantz, 2005).

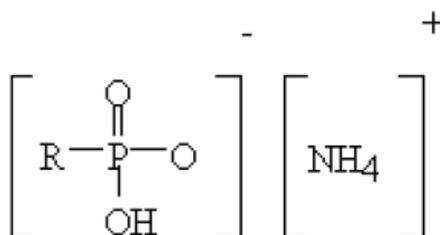


Figura 35.- Estructura química de Fosfatidos de amonio.

3.2.4.2 Poliglicerol polirricinoleato (PGPR); E-476

Una de las tendencias más actuales en las formulaciones comerciales de chocolate es el uso de PGPR (E-476) (Figura 36) recomendado en sinergia con la fosfatida o la lecitina de soya. Usado en concentraciones de 0.1% a 0.5% disminuye en óptimos resultados el valor del esfuerzo umbral con una excelente estabilidad más allá de la ofrecida por la lecitina de soya, donde la viscosidad solo es disminuida sigilosamente. Durante el moldeado permite la eliminación de la presencia de burbujas de aire y mejor distribución del chocolate fundido durante el moldeado (Schantz B. , 2005)

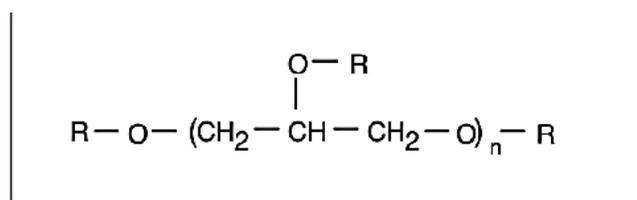


Figura 36.- Estructura química de poliglicerol polirricinoleato-PGPR

3.2.4.3 Lecitina de Soya; E-322

En la industria chocolatera, la lecitina fue implementada en 1930 por Hanse-Muhle. La lecitina de soya es un aditivo alimentario natural y uno de los emulsificantes más empleados en la industria de los dulces.

Se obtiene como subproducto de la industria de los aceites, principalmente de soya, durante el proceso de refinación (Ramírez Gómez, 2011). Químicamente es una mezcla de fosfolípidos, triglicéridos y glicolípidos; insoluble en agua (Figura 37).

Es usada en concentraciones que van de 0.3% a 0.5% w/w, llegando a reducir 10 veces el contenido de manteca de cacao con respecto a una formulación de chocolate sin aditivo alguno, lo que conviene para la reducción de costos de producción.

Se presenta un efecto contrario al deseado empleando concentraciones mayores de 0.5% en formulación de chocolate; aumentando el umbral de fluencia aunque normalmente la viscosidad sigue disminuyendo (Beckett S. , 1994) (Schantz B. , 2005)

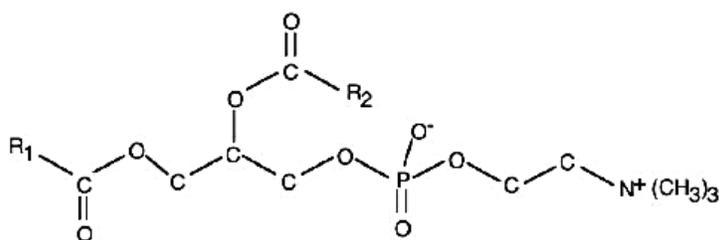


Figura 37.- Estructura química de la lecitina de soya.

Según Minifie (1980) la acción de la lecitina es sobre las partículas de azúcar, siendo muy débil en la mezcla de licor de cacao; es decir, el efecto reductor de la viscosidad de la lecitina de soya en las formulaciones de chocolate es más fuerte en la mezcla de manteca/ azúcar.

III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Elaboración de chocolate oscuro

Las muestras de chocolate oscuro son obtenidas bajo las mismas condiciones de proceso (temperatura-tiempo-velocidad) en cada una de las operaciones unitarias involucradas en la producción de chocolate oscuro. El Diagrama 1 resume la metodología de elaboración de muestras empleadas; en el Diagrama 2 se expresan las etapas de elaboración de piezas de chocolate amargo para consumo.

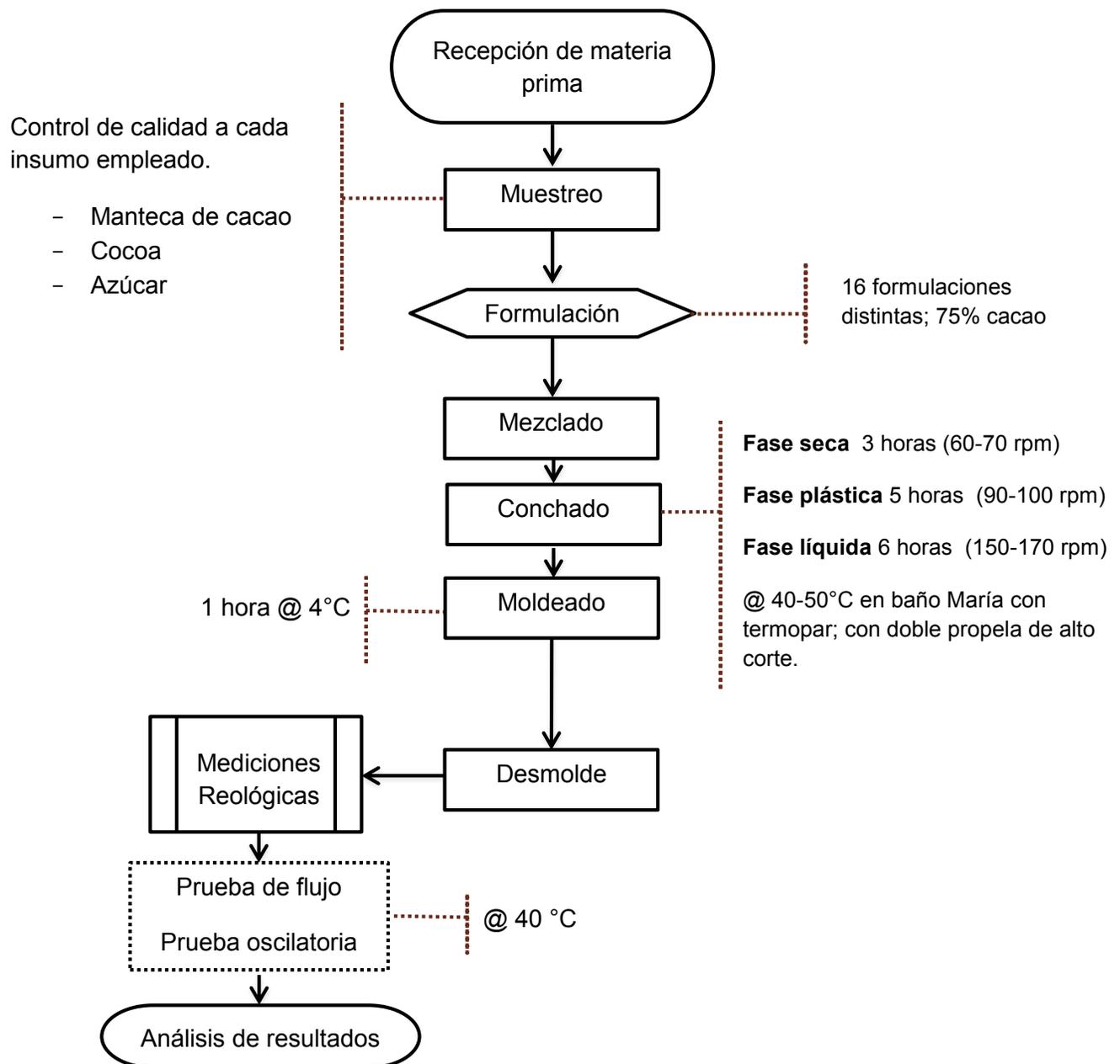


Diagrama 1.- Metodología empleada para el análisis reológico de formulación de chocolate oscuro modificado con fosfatidos de amonio y su comparación con formulaciones de chocolate oscuro con la presencia de emulsificantes comerciales (lecitina de soya y PGPR).

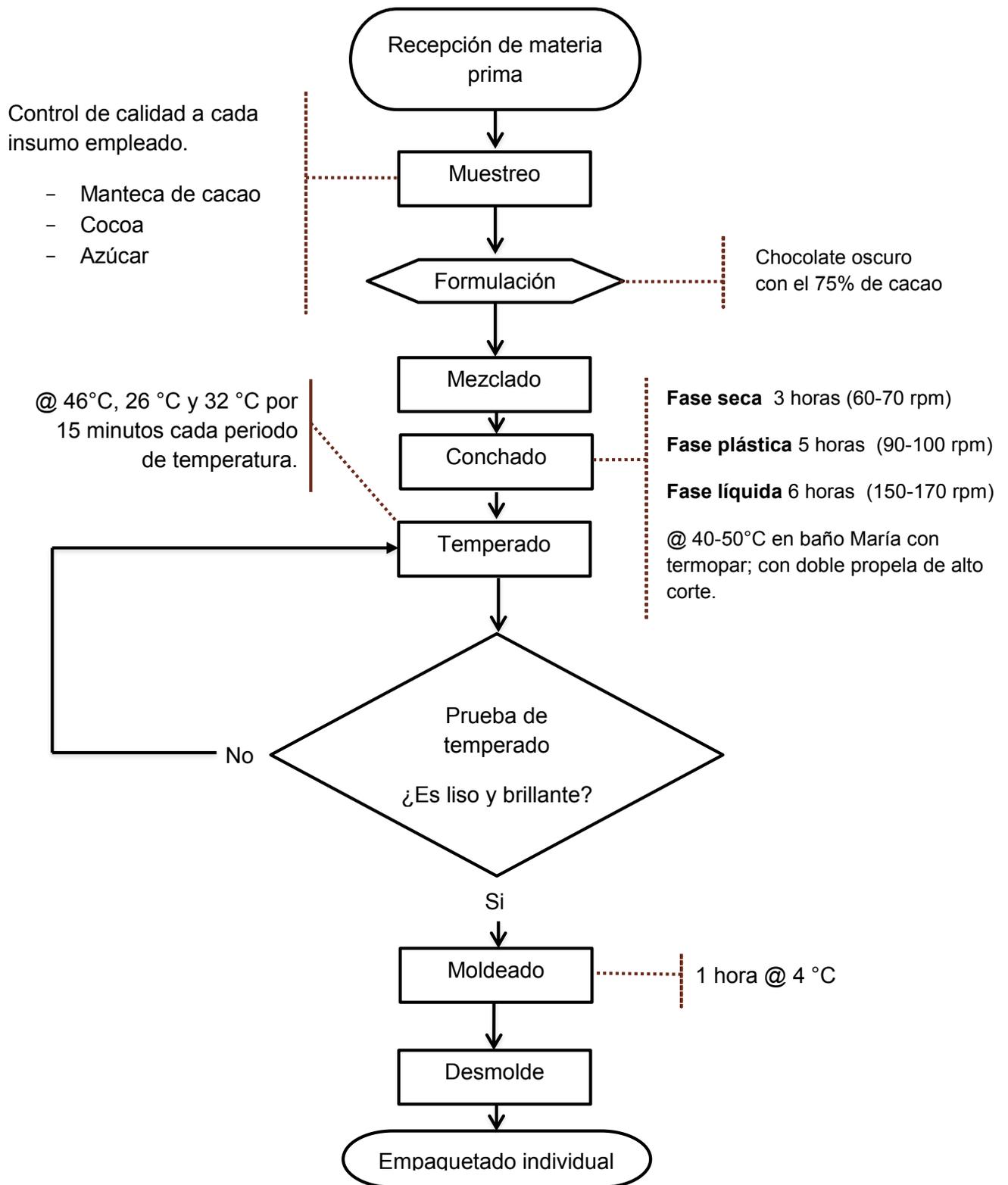


Diagrama 2.- Proceso de elaboración de chocolate amargo para consumo.

Í. Pruebas físicas y químicas de los insumos

Los insumos empleados en la elaboración de muestras para la experimentación, fueron analizadas según las normas oficiales NOM-186, NMX-343 y NMX-352. En este apartado se describe cada una de las pruebas realizadas a cada uno de los ingredientes involucrados en la formulación de chocolate oscuro al 75% de cacao como grano entero; de lo cual 35% corresponde a manteca de cacao.

Los resultados presentados fueron obtenidos por promedio de las pruebas realizadas por triplicado.

Manteca de cacao

Se establece en la Norma Mexicana 343 del 2007, que la manteca de cacao debe cumplir las especificaciones de calidad sanitaria, que apliquen técnicas de elaboración apropiadas para usarse en la industria alimentaria. La manteca de cacao debe cumplir con las especificaciones fisicoquímicas a continuación descritas:

Temperatura de fusión



La temperatura de fusión de la manteca de cacao fue determinada por medio de un aparato de Fisher-Johnes; se colocaron 2 g de manteca de cacao anotándose la temperatura a la que empieza y termina de fundir la muestra.

Acidez titulable



Material:

Matraz Erlenmeyer de 125 mL
 Bureta de 50 mL
 Baño María -Parrilla eléctrica
 3 g de manteca de cacao
 75 mL de alcohol etílico anhidro
 Fenolftaleína
 Solución de KOH 0.05 N

Se pesaron 0.5 gramos de manteca de cacao y se disolvió en 25 mL de alcohol etílico anhidro en un matraz Erlenmeyer de 125 mL a baño maría; se adicionaron 2 gotas de fenolftaleína como indicador y se tituló con una solución de KOH 0.05N.

Índice de saponificación



Material:

Equipo de reflujo
 Parrilla eléctrica
 Matraz bola
 Pipeta volumétrica
 6 g de manteca de cacao
 Fenolftaleína
 75 mL de solución alcohólica de KOH 0.5N
 Solución de HCl 0.5N

Se colocaron 2 g de manteca de cacao y 25 mL de la solución de KOH 0.5N en un matraz bola; se colocó en reflujo durante una hora. Se empleó 1 mL de fenolftaleína como indicador, se tituló en caliente con HCl 0.5N.

Cocoa

Distribución de tamaño de partícula

Existen dos objetivos principales a cumplir durante la molienda del cacao tostado. El primero es lograr que las partículas de cacao sean lo suficientemente pequeñas para la fabricación de chocolate; y segundo, la extracción de la mayor cantidad de manteca posible de las células del cotiledón (Minifie, 1980) (Beckett S. T., 2008).

La industria requiere partículas en el licor de cacao con un valor de 50 - 100 μm [Becket, 2008] para mejores comportamientos de fluencia, es decir: el valor de umbral de flujo, que está su vez ligado a la distribución de las partículas en la fase grasa del chocolate.

Se trabajó con cocoa del grupo Turín® con especificaciones respaldadas.

Se analizó la medición del tamaño de partícula por dos técnicas diferentes de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI):

- I. Difracción de rayos láser (DRL) [Malvern Instruments- Mastersizer 2000]
- II. Microscopía electrónica de barrido (MEB).

Azúcar

Se trabajó con azúcar glass de Bremen®, con especificaciones respaldadas.

Emulsificantes

Se emplearon emulsificantes del grupo Palsgaard® México, con las especificaciones correspondientes presentadas en la ficha técnica del distribuidor.

ii. Formulación de chocolate amargo

Se elaboró chocolate amargo con el 75% de cacao (Tabla 16.) Los chocolates a elaborar están en función de la NOM-186-SSA1/SCFI-2002.

Tabla 16. Formulaciones trabajadas en el laboratorio para elaboración de chocolate amargo.

Licor obtenido		% Aditivos a estudiados en la formulación de Chocolate Amargo			
Ingrediente	ChA (%)	Fosfatida	PGPR	Lecitina de soya	Mezclas
		E-442	E-476	E-322	
Manteca de Cacao	35	0.4	0.15	0.3	0.15% PGPR + 0.3% Lecitina
Sólidos totales de cacao	40	0.6	0.30	0.4	0.6% Fosfatida + 0.15% PGPR
Azúcar	*	1.0	0.40	0.6	0.6% Fosfatida + 0.3% Lecitina

*Función de la diferencia en la formulación.

iii. Conchado

El conchado se realizó en tres etapas con un total de 14 horas por lote de 250g a 40 - 50°C; temperatura medida con termopar; el conchado se realizó con la implementación de una propela de alto corte doble (Figura 38) en tres etapas:



Figura 38.- Equipo de conchado.

Fase seca: conchado a velocidad de 60 rpm por 3 horas, 100% de sólidos (cocoa y azúcar) y 75% de manteca de cacao

Fase plástica: conchado a 90 rpm por 5 horas, adicionando 15% de manteca de cacao restante de la formulación.

Fase líquida: 150 rpm por 6 horas, adicionando el aditivo correspondiente en la formulación.

iv. Moldeado y desmolde



Material:

Moldes de polipropileno de alta densidad.

Hilera - hielo

Termómetro

Papel aluminio

Para realizar las piezas de chocolate amargo, se emplearon moldes de polipropileno de alta densidad de uso alimentario.

Los moldes llenos con el chocolate fundido fueron cubiertos con papel aluminio para evitar el contacto directo del chocolate con humedad o cualquier agente contaminante alterno. El periodo de moldeado fue de una hora a 4 °C.

v. Mediciones reológicas

Las mediciones reológicas efectuadas han sido dentro de la zona viscoelástica lineal; se efectúan de dos tipos: prueba de flujo y oscilatoria de pequeña amplitud (ICCO, 2000); empleando un reómetro de esfuerzo controlado **AR-G2 de TA Instruments** (Figura 39 y 40), con una geometría de acero de platos paralelos de 40 mm y un espesor de muestra (GAP) de 1000µm con una tolerancia de 4µm.



Figura 39.- Reómetro GA-R2 TA Instruments. Empleado en la experimentación.



Figura 40.- Geometría de platos paralelos. Útil para medición de viscosidades bajas.

Se trabajó con una masa aproximada de 2 g de muestra previamente fundidas en baño maría en un intervalo de 40 a 50°C para garantizar que la matriz grasa del chocolate estuviera completamente fundida y evitar la presencia de grumos grasos en la medición. El análisis gráfico se realiza en la versión V5.5.0 de AR-G2 Instruments 8.29 - 2009.

Las pruebas reológicas aplicadas a las muestras de chocolate amargo fueron:

a) Prueba de flujo

Las pruebas de flujo se realizaron a temperatura constante de 40 °C (0.1 °C de tolerancia) especializadas en la obtención del valor de viscosidad cortante; en la cual, hay un incremento de velocidad durante la determinación con una tolerancia de 5.0% (incluida la prueba de oscilación).

b) Prueba oscilatoria

Las pruebas oscilatorias se realizaron a temperatura constante de 40°C (0.1°C de tolerancia). Consisten en barridos dentro de la zona viscoelástica para la determinación de los módulos dinámicos en función de la frecuencia (módulo elástico G' y módulo viscoso G'') de los cuales se puede conocer la energía necesaria para la deformación, ya sea recuperable o no; conocida como módulo complejo $|G^*|$ así como el factor de pérdida de energía ($\text{Tan } \delta$).

ví. Elaboración de piezas de chocolate para venta y consumo

La producción de chocolate amargo para consumo, se realizó completando el proceso con la etapa de temperado, moldeado y finalmente el empaque.

Temperado



El chocolate conchado y fundido fue llevado a 46-48°C durante 15 minutos en un baño maría.

Posteriormente la temperatura del chocolate es disminuida a 26 °C durante 15 minutos y finalmente es elevada a 32°C para poder ser moldeado a 4°C durante una hora. Tras el moldeado, la pieza debió ser brillante, lisa y resistente a la temperatura del tacto para poder ser empaquetada.

Empaque



Material:

Papel glassine
Papel aluminio
Cajas de cartón corrugado

Las piezas de chocolate amargo fueron dispuestas a envoltura individual; se empleó papel glassine por diseño de presentación (Ver sección 2.3.2) grado alimenticio a una tinta como empaque primario y cajas de cartón corrugado a una y dos tintas como empaque secundario.

Las cajas con papel glassine para la manipulación del producto, proporciona una excelente resistencia y propiedades físico mecánicas que permiten el troquelado tanto manual como mecánico al hablar de producción automática. El papel glassine es resistente al paso de las grasas y da una excelente presentación al producto empacado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas físicas y químicas de los insumos

La microestructura del chocolate es compleja debido a la naturaleza de sus ingredientes y la influencia de los mismos en la estructura y comportamiento final del producto. La descripción de los ingredientes empleados en la formulación de chocolate oscuro, se encuentran con detalle en el Anexo I.

Las muestras de chocolate amargo fueron elaboradas con ingredientes certificados, tabulados en la Tabla 17.

Tabla 17.- Resultados de calidad de los insumos para elaboración de muestras.

Ingrediente	Parámetro	Valor experimental	Valor establecido por la NOM
Manteca de cacao	Temperatura de fusión (°C)	36	31-35
	Acidez titulable (% ác. Oleico)	1.27	Máximo 2.0
	Índice de saponificación (mg KOH/g)	185.3	192-200
	Sensorial	Excelente	Ver Anexo I; Ficha 3
Cocoa Grupo Turín®	Tamaño de partícula por difracción láser (µm)	126.7	50-100
	Microscopia Electrónica de Barrido	Ver Anexo I; Ficha 1	No disponible
	Humedad (%m/m)	2.1	1.8 – 2.0
Azúcar Glass Bremen®	Tamaño de partícula	0.1 mm	0.005-0.1 mm
	Humedad %(m/m)	0.41	< 0.5

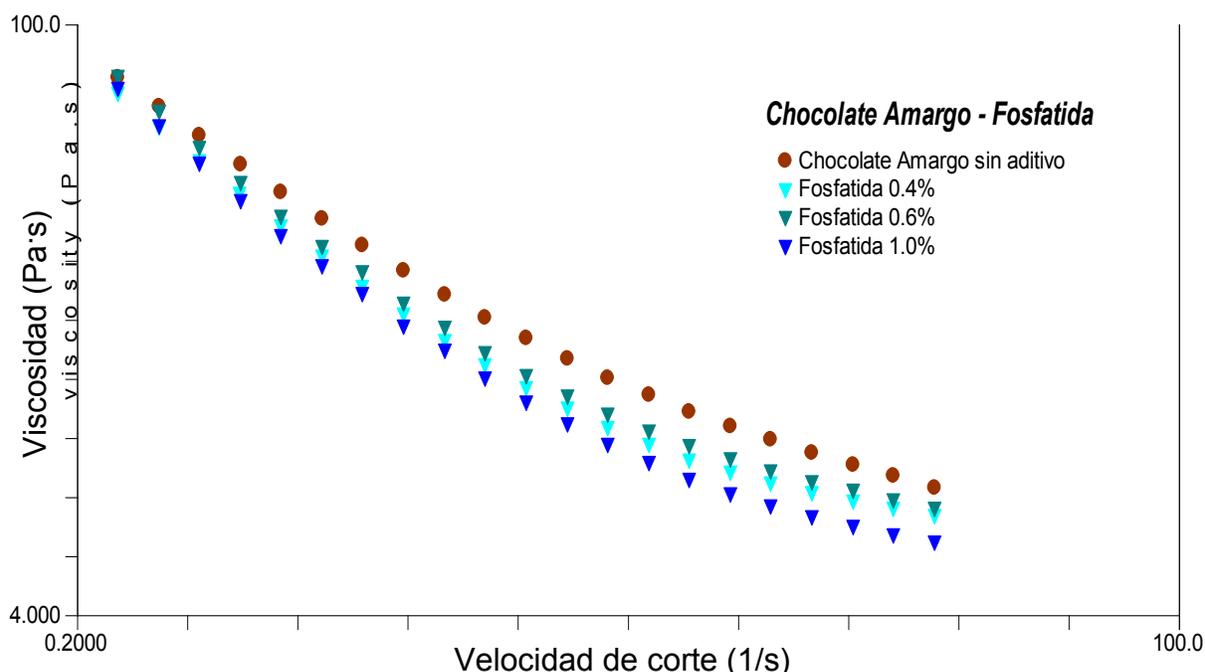
La manteca de cacao y el azúcar cumplen con las especificaciones establecidas por la NOM-186-SSA1/SCFI-2002 Chocolate y productos similares y la NMX-F-343-SCFI-2007 Manteca de cacao. La cocoa Turín® cumple los estándares proporcionados por el departamento de calidad y es empleada para estandarización de la distribución del tamaño de partícula. Los ingredientes son aceptados para elaboración de muestras y el trabajo experimental.

Mediciones reológicas

I. Evaluación de las curvas de flujo

El análisis gráfico de las pruebas realizadas se efectuó mediante el software Rheology Advantage/Data Analysis en la versión V5.5.0 de AR-G2 Instruments 8.29 – 2009 de TA Instruments en función del modelo de Casson.

En esta primera parte experimental se realizaron pruebas de flujo con velocidad de corte controlada para luego evaluar la viscosidad de las muestras. La Gráfica 2 representa la curva de flujo de la muestra de chocolate amargo elaborada con fosfatida (E-442) como emulsificante principal en la formulación y una muestra de chocolate amargo sin aditivo.



Gráfica 2.- Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo y con fosfatida al 0.4%, 0.6% y 1.0% en la composición de la fórmula de chocolate amargo. Análisis a 40.0 °C.

Tabla 18.- Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con fosfatida.

Muestra		Esfuerzo umbral (Pa)	Viscosidad plástica de Casson (Pa s)
Sin Aditivo		16.450	3.855
Fosfatida (E-442)	0.4%	9.718	4.005
	0.6%	15.330	3.350
	1.0%	9.977	3.268

- Emplear fosfatida en el chocolate amargo, representa una disminución de la viscosidad plástica en las concentraciones evaluadas 0.6% y 1.0%.
- La formulación con 1.0% de fosfatida presenta una viscosidad plástica de Casson menor (3.268 Pa·s) a la muestra sin aditivo (3.855 Pa·s); además la muestra sin aditivo tiene una disminución del esfuerzo umbral de 16.45 Pa a 9.977 Pa en la muestra con 1% de fosfatida en la formulación.
- Al aumentar la velocidad de corte durante la prueba se aprecia una disminución de viscosidad se tenga o no la presencia del emulsificante, comportamiento característico de un fluido no newtoniano.

Como se ha descrito, el chocolate es una fase continua de grasa en donde el azúcar, siendo hidrofílica y lipofóbica no se disolverá, de tal modo que la superficie debe coexistir con la grasa del producto, es aquí en donde el emulsificante hace su trabajo (Figura 41) permitiendo que el contenido graso del chocolate pueda ser la razón principal de las propiedades de flujo inclusive al ser reducida la cantidad de manteca de cacao en la formulación.

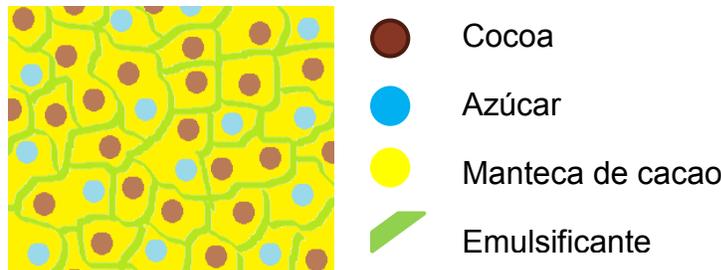


Figura 41.- Distribución general de los ingredientes participantes en la formulación de chocolate.

Elegir el emulsificante ideal para el efecto requerido en las cualidades de desplazamiento del chocolate fundido en estado semisólido depende de las condiciones de proceso y del tipo de producto a elaborar (Schantz B. , 2005). Estudios realizados en función del comportamiento reológico del chocolate, entre ellos los realizados por Birgit Schantz del Instituto de Tecnología de Alimentos e Ingeniería de Bioprocesos, indican que el uso de la lecitina de soya cambia significativamente (95% de probabilidad) el valor de la viscosidad plástica y el valor umbral al ser empleada en un rango de 0.1% a 0.3% de la formulación trabajada; a porcentajes mayores de 0.5% el valor umbral aumenta mientras que la viscosidad plástica sigue disminuyendo.

En la tabla 19, se puede apreciar el aumento del valor umbral en la muestra con 0.6% de lecitina de soya mientras que la viscosidad plástica en las muestras con 0.3% y 0.4% está por debajo de la viscosidad que presenta la muestra analizada sin aditivo.

Tabla 19.- Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con lecitina de soya

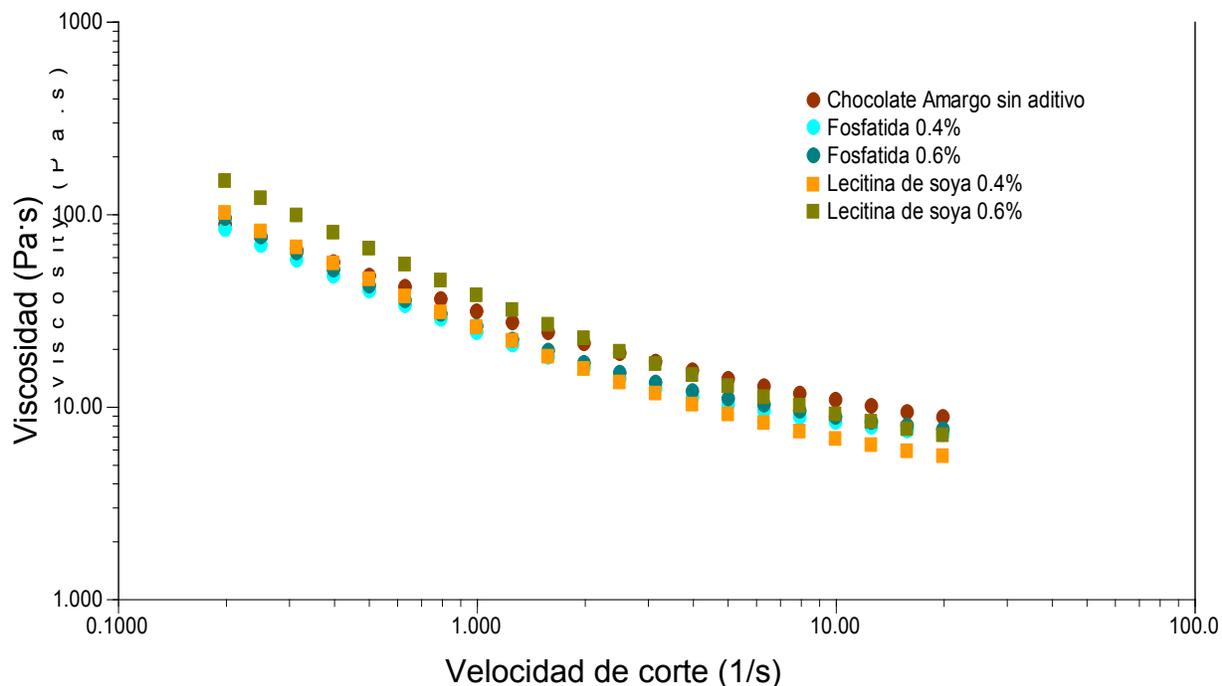
Muestra		Esfuerzo umbral (Pa)	Viscosidad plástica de Casson (Pa s)
Sin Aditivo		16.45	3.855
Lecitina de soya (E-322)	0.3%	5.445	3.790
	0.4%	6.737	3.274
	0.6%	7.528	4.107

El incremento en el valor umbral está relacionado directamente con la formación de micelas de grasa en capas alrededor de las partículas de azúcar lo que dificulta el flujo; el engrosamiento depende también de la distribución del tamaño de partícula, mientras más pequeñas sean las partículas más lecitina es necesaria para el recubrimiento de la superficie del azúcar .

En contraste con la lecitina de soya, el PGPR es utilizado en porcentajes mayores a 0.5% de la formulación de chocolate. Este aditivo no tiene efectos sobre la viscosidad plástica pero puede reducir el valor umbral hasta un 50% (Schantz B. , 2005) reduciendo el contenido de manteca hasta 3% con 0.1% del aditivo en la formulación.

En contraste con la lecitina de soya, el PGPR no se estructura dentro de la suspensión sino que actúa aumentando el volumen de la fase continua (es decir, la grasa) y se une al agua residual presente en el chocolate indisponiéndola a hidratar las partículas sólidas presentes como el azúcar o cocoa (Rector, 2000) (Schantz B. , 2005).

En la Gráfica 3 y 4 se compara el efecto de la fosfatida con respecto al efecto de dos emulsificantes comúnmente empleados en la industria del chocolate.

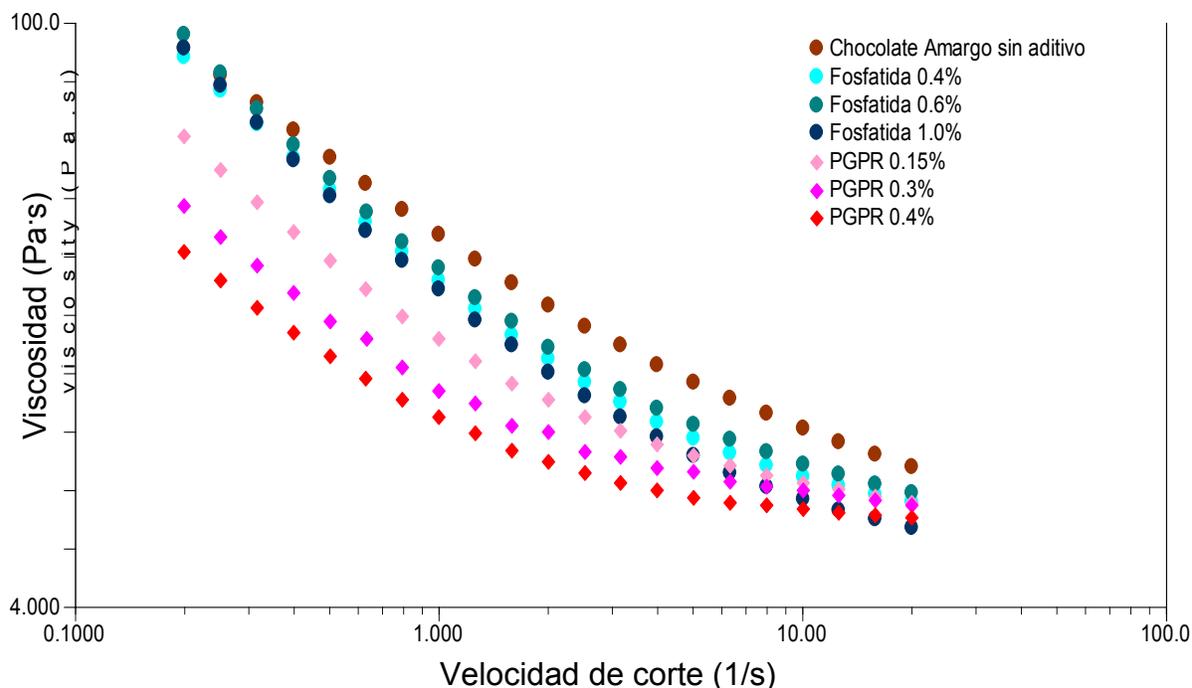


Gráfica 3.- Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo, lecitina de soya al 0.4% y 0.6% y muestras de chocolate amargo con fosfatida en la composición de la formulación. Análisis a 40.0 °C

En la gráfica anterior se aprecian los siguientes comportamientos:

- La muestra con presencia de 0.4% de lecitina de soya es la que presenta mayor disminución de la viscosidad a partir de 1.0 s^{-1} de velocidad de corte.
- La muestra sin emulsificante en la formulación presenta una viscosidad ligeramente mayor a las muestras con presencia de aditivo.
- La muestra con 0.6% de lecitina de soya presenta una viscosidad por arriba de la que tiene la muestra sin emulsificante en el intervalo de 0.1 a 2.0 s^{-1} .
- Las muestras con 0.4% y 0.6% de fosfatida tienen un comportamiento similar a lo largo de todo el intervalo de velocidad de corte

En la Gráfica 4, se ven las curvas de flujo de las muestras con presencia de fosfatida y PGPR en la formulación.



Gráfica 4.- Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo, PGPR al 0.15%, 0.3% y 0.4% y muestras de chocolate amargo con fosfatida en la composición de la formulación. Análisis a 40.0°C

La gráfica anterior exhibe las curvas de flujo de las muestras con presencia de PGPR y fosfatida exhibiéndose los siguientes comportamientos:

- La muestra sin presencia de emulsificante presenta una viscosidad mayor que las muestras con aditivo en la formulación.
- La muestra con fosfatida tiene una viscosidad mayor a la muestra sin emulsificante a velocidades de corte menores a 0.1 s^{-1} .
- La muestra con 1.0% de fosfatida presenta menor viscosidad entre las muestras con 0.4% y 0.6% del mismo aditivo.
- Las muestras con PGPR como emulsificante principal en la formulación presentan las viscosidades menores, siendo 0.4% de PGPR la concentración que reduce al máximo la viscosidad en las muestras de chocolate en el intervalo de 0.1 a 10.0 s^{-1} .
- Fosfatida al 1.0 % a velocidades mayores de 10 s^{-1} tiende a reducir la viscosidad por debajo de la que presenta la muestra con PGPR.

En el caso de las muestras con PGPR, la disminución del valor umbral es mucho mayor, incluso empleándose en el mismo porcentaje que la fosfatida; al trabajar muestras con el 0.4% de fosfatida y de 0.04% de PGPR, se observa que la fuerza para iniciar el flujo disminuye de 9.718 Pa con la fosfatida a 5.902 Pa con la presencia de PGPR respectivamente quedando la viscosidad plástica muy similar (Tabla 20). Generalmente, la viscosidad disminuye continuamente con el incremento del contenido de emulsificante.

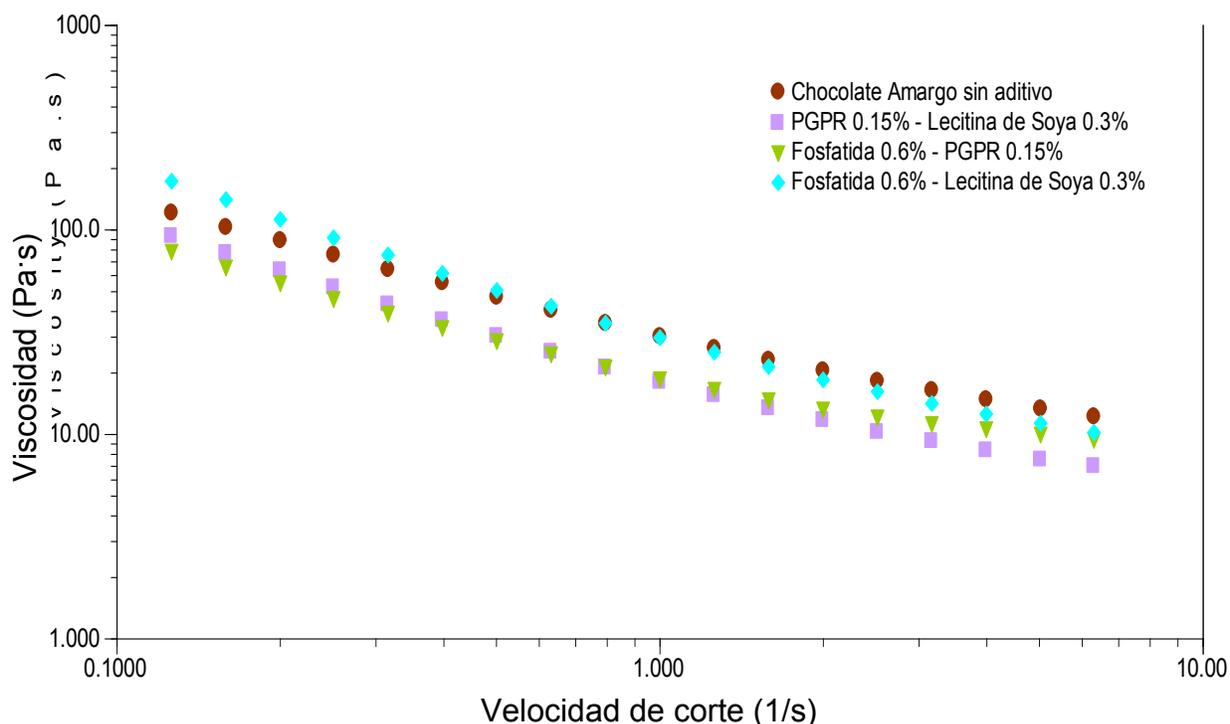
Tabla 20.- Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con PGPR

Muestra		Esfuerzo umbral (Pa)	Viscosidad plástica de Casson (Pa s)
Sin Aditivo		16.45	3.855
PGPR (E-476)	0.15%	4.681	4.592
	0.3%	7.648	3.908
	0.4%	5.902	4.016
Fosfatida (E-442)	0.4%	9.718	4.005

Como bien se puede ver, la actividad del PGPR es contrario al efecto que ocurre con la fosfatida, pasando la velocidad de corte de 8 s^{-1} la viscosidad de la muestra aumenta, mientras que el chocolate con fosfatida sigue disminuyendo la viscosidad conforme aumenta la velocidad de corte en la medición.

La ficha técnica proporcionada por Palsgaard ® indica que la fosfatida empleada para la elaboración de chocolate resulta eficiente – eficaz tras su empleo en sinergia con PGPR; mientras que el aditivo más común (la lecitina) tiene un mejor efecto adelgazante al trabajar en sinergia con PGPR.

Las curvas de flujo obtenidas del análisis de las muestras de chocolate amargo con la presencia de las mezclas de correspondientes de los aditivos revelan lo siguiente (Gráfica 5).



Gráfica 5.- Curva de flujo de muestras de chocolate amargo sin aditivo y mezclas de aditivos en la composición de la formulación. Análisis a 40.0 °C

- Las curvas de flujo representadas en la gráfica 5, señalan una diferencia en el comportamiento de flujo en las muestras de chocolate con mezclas de emulsificantes con la fosfatida estudiada.
- Todas las muestras presentan una disminución en la viscosidad conforme aumenta la velocidad de corte; solo la muestra con la mezcla de fosfatida-PGPR muestra un aumento en la viscosidad después de 1 s^{-1} .
- La mezcla de fosfatida-lecitina de soya presenta una viscosidad mayor que la muestra sin aditivo en el intervalo de 0.1 a 1.0 s^{-1} .
- La muestra con la mezcla PGPR-lecitina de soya es la que presenta valores de viscosidad menores en el intervalo de 0.5 a 10.0 s^{-1} ; siempre siendo una viscosidad menor a la presentada por la muestra de chocolate sin emulsificante en la formulación.

Los valores de esfuerzo umbral y viscosidad plástica de Casson reportadas en la Tabla 21 son un panorama de las ventajas que tiene el uso de mezclas de emulsificantes en la formulación para el abatimiento de dichas propiedades.

Tabla 21.- Valores de prueba de flujo para chocolate amargo con mezclas de emulsificantes.

Muestra		Esfuerzo umbral (Pa)	Viscosidad plástica de Casson (Pa s)
Sin Aditivo		16.450	3.855
Mezclas	476-0.15% 322-0.3%	6.308	2.969
	476-0.15% 442-0.6%	5.579	3.097
	442-0.6% 322-0.3%	12.780	3.365

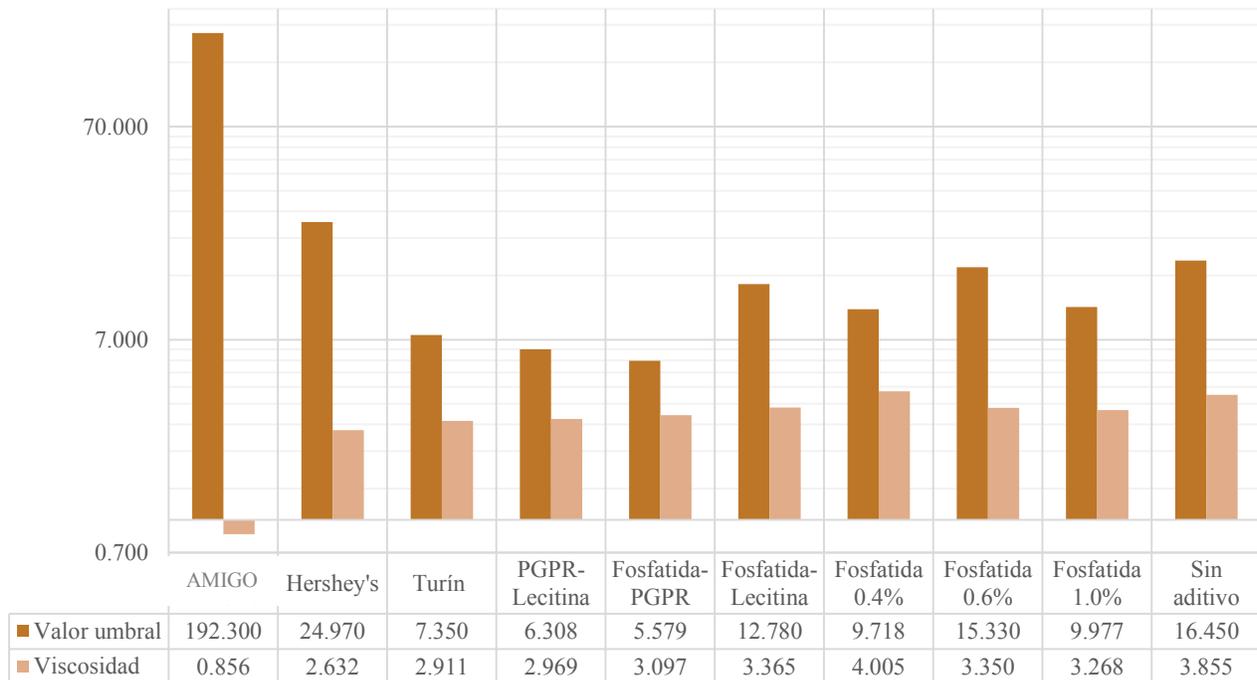
Como ya se mencionó, la mezcla de PGPR – lecitina de soya (476-322) presenta el menor valor de viscosidad plástica de Casson. El esfuerzo umbral es menor en la muestra con presencia de fosfatida-PGPR, mientras que la muestra con fosfatida-lecitina de soya no se ve tan drásticamente reducido.

Estudios realizados (Rector, 2000) (Schantz B. , 2005) (Graef & etal, 2011) (Mugüerza, 2011) han indicado que la mezcla ideal para la reducción de la viscosidad en el chocolate es PGPR-lecitina de soya, esta mezcla es óptima tanto en la reducción de la viscosidad plástica de Casson como del valor umbral en la muestra.

En el estudio realizado, la muestra con PGPR y lecitina de soya muestran las mejores reducciones de viscosidad: de 3.855 Pa·s de la muestra sin emulsificante a 3.969 Pa·s; aunque no el valor más bajo para el valor umbral, siendo el más bajo el presentado por la muestra con fosfatida y PGPR, a su vez esta muestra evaluada es la segunda mejor en la disminución de la viscosidad del producto fundido. La muestra con mezcla de fosfatida al 0.6% y 0.3% de lecitina de soya tiene un valor umbral de 12.780 Pa mucho más alto que las muestras evaluadas con cualquiera de los tres emulsificantes analizados en la formulación. Tiene una viscosidad por arriba del chocolate sin aditivo a velocidades de corte menores que van de 0.1 s⁻¹ a 0.6 s⁻¹.

El comportamiento reológico presentado por las muestras con presencia de fosfatida y las mezclas correspondientes, fue contrastado con las características de flujo de tres marcas de chocolate amargo con el mismo contenido de manteca de cacao que el producto elaborado en la experimentación (Gráfica 6).

Las marcas evaluadas fueron Hershey's, Turín y Amigo [chocolate amargo importado de Costa de Marfil] siendo sometidas a prueba de flujo y oscilatoria en las mismas condiciones que las muestras experimentales.



Gráfica 6.- Bosquejo de valores de umbral (Pa) y viscosidad plástica de Casson (Pa s) para muestras de chocolates comerciales, muestras con presencia de fosfatidos de amonio y mezclas con emulsificantes comerciales.

Como se puede ver en la gráfica 6, la relación que se presenta entre el valor umbral y la viscosidad plástica de Casson de cada una de las muestras experimentales analizadas, es muy alejada del comportamiento de las muestras de chocolates comerciales comparados. Acorde a las especificaciones del uso de los fosfatidos de amonio se puede decir que:

- La mezcla de lecitina de soya y PGPR es la muestra más cercana al comportamiento de un chocolate comercial: Turín.

Esta mezcla tiene un valor umbral menor que el chocolate sin aditivo y como el valor presentado por la muestra comercial; sin embargo, tras disminuir la viscosidad plástica de la formulación sin emulsificante de 16.450 Pa s a 6.308 Pa s muestra un aumento en comparación al producto que Turín ofrece. Dicho comportamiento es de esperarse pues las muestras fueron elaboradas con cocoa comercial del grupo Turín, estandarizando el tamaño de partícula a pesar de elaborar muestras sin la etapa de refinamiento como establece la industria chocolatera.

De las muestras comerciales, Amigo y Hershey's reportan lecitina de soya como emulsificante en la formulación. Entre ellos, se puede decir que:

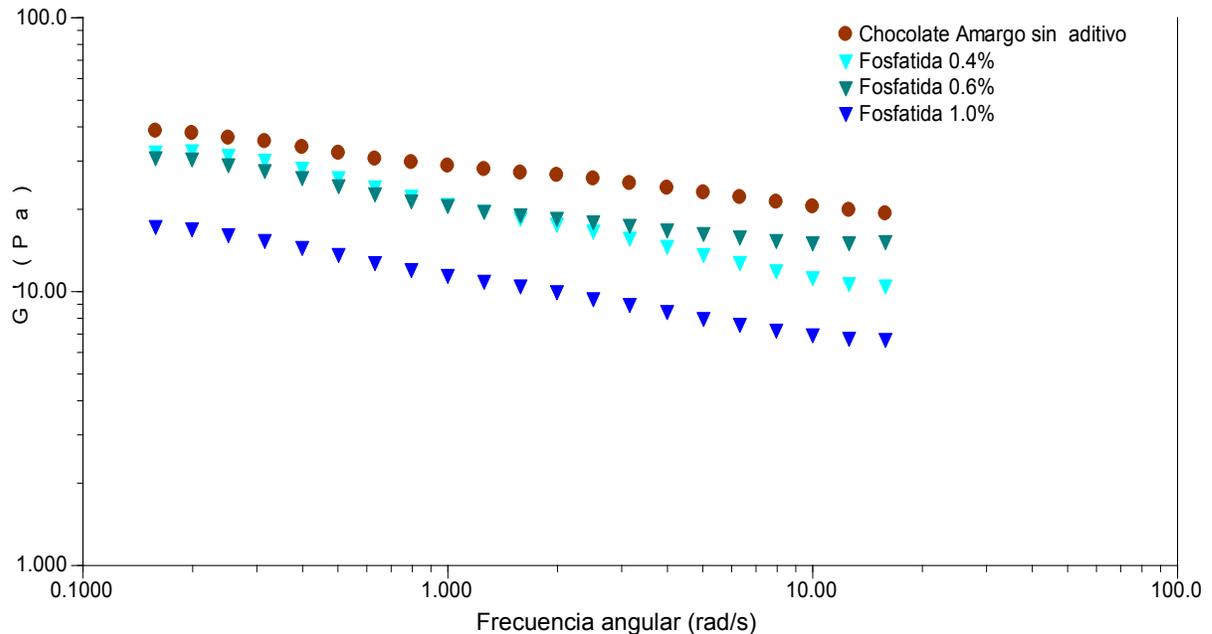
- Amigo tiene un valor umbral muy alto (192.3 Pa) y la única con una viscosidad muy baja siendo de 0.856 Pa s que ninguna de las formulaciones con lecitina de soya analizadas presentó. Tal comportamiento es resultado de las condiciones de proceso y características fisicoquímicas de los insumos empleados; sin mencionar que la dosificación del emulsificante en la elaboración del chocolate amargo comercial es un dato que difícilmente se podrá conocer, pero con ayuda de las pruebas reológicas es muy posible simular el comportamiento del producto comercial en una nueva alternativa en el mercado de chocolate.

El análisis de varianza (ANOVA) de dos factores con probabilidad del 95% indica que:

- El comportamiento del valor umbral entre las muestras evaluadas es el mismo sin importar el emulsificante ni cantidad empleadas en la formulación.
- Las muestras presentan una variación significativa en la viscosidad entre los emulsificantes y las mezclas analizadas, sin importar la concentración en la que se encuentren dosificados en la formulación.

II. Evaluación de la prueba oscilatoria

La caracterización reológica se presenta en términos de los módulos dinámicos: elástico (G') y viscoso (G''), en función de la frecuencia angular [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] en la zona de viscoelasticidad lineal.



Gráfica 7.- Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida en la formulación y análisis de módulo elástico en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s]. Análisis a $40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la Gráfica 7 se observan las curvas correspondientes a los barridos de frecuencia de las muestras con fosfatida en la formulación. Estas muestras presentan los siguientes comportamientos:

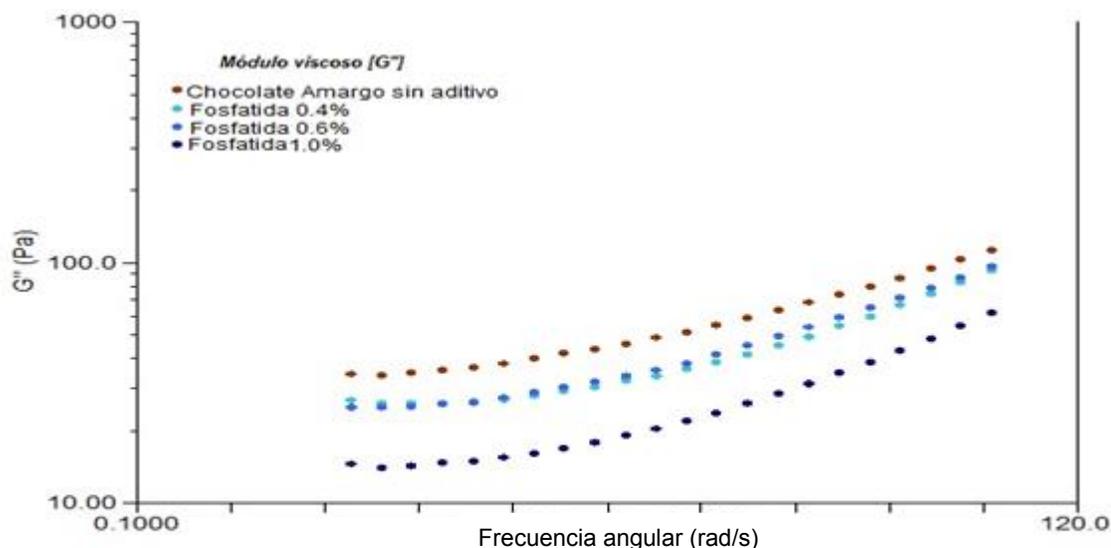
- La muestra sin emulsificante presenta el valor más alto del módulo elástico.
- Todas las muestras a excepción de la muestra con 0.6% de fosfatida, presentan una tendencia a la disminución del módulo elástico conforme se aumenta la frecuencia angular (temperaturas disminuyen)
- La muestra con 0.6% de fosfatida tiende a bajar el valor del módulo elástico en la zona de bajas frecuencias angulares (intervalo de 0.1 a 2.0 rad/s) es decir a temperaturas altas; mientras que el valor del módulo elástico tiende a aumentar en la zona de alta frecuencia angular (de 2.0 a 11.0 rad/s) es decir a temperaturas bajas.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que al chocolate sin emulsificante en la formulación presenta un comportamiento interno con mayor almacenamiento de energía que las muestras con fosfatida como emulsificante principal en la formulación, esto quiere decir que la muestra en efecto es más viscosa.

Los valores del módulo de pérdida son los más altos que los valores arrojados en el módulo de almacenamiento, lo que indica que las muestras de chocolate amargo tuvieron un sólido comportamiento de tipo viscoso.

En la gráfica 7 se puede observar que:

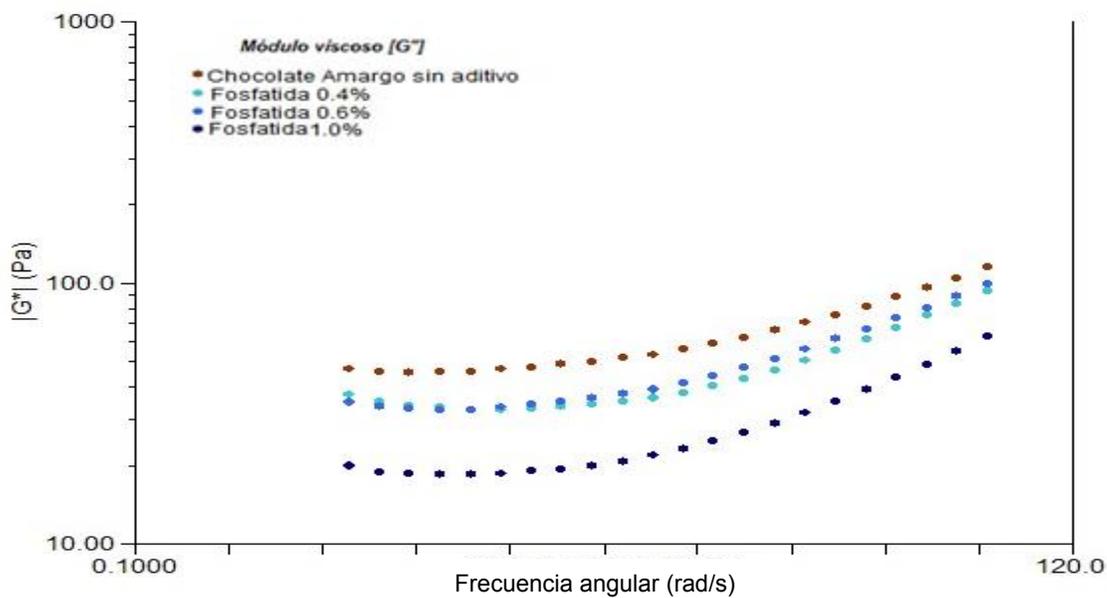
- La muestra con una concentración de 0.6% de fosfatida tiene un comportamiento en el módulo elástico muy similar a la muestra con el 0.4% en el intervalo de frecuencias bajas, de 0.1 a 1 rad/s (temperaturas altas).
- Al aumentarse la frecuencia angular a 4 rad/s (aumentar la temperatura) el módulo elástico de la muestra con 0.4% de fosfatida disminuye.
- La muestra con 0.6% de fosfatida tiene un comportamiento en el módulo elástico muy parecido al observado en la muestra de chocolate amargo sin presencia de emulsificante.
- La mayor concentración de fosfatida (1.0%) presenta valores del módulo elástico menores a lo largo del intervalo de frecuencia utilizado.



Gráfica 8.- Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida en la formulación y análisis de módulo viscoso en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s]. Análisis a 40.0 °C

En la gráfica 8, se observa que:

- Al aumentar la frecuencia angular (rad/s) el chocolate se ve incrementado en el valor del módulo viscoso, esto en función de la disminución de la temperatura interna por colisión reducida entre las partículas debido a la solidificación de la manteca que representa la mayor parte de la fluidez del material; resultando así una aplicación de esfuerzo mayor para poder causar una deformación en el chocolate fundido.
- Las muestras con concentraciones de 0.4% y 0.6% de fosfatida presentan un comportamiento en el módulo viscoso muy similar resultando la formulación con 0.6% de fosfatida la muestra con un módulo viscoso menor a lo largo de todo el intervalo de frecuencia angular, lo cual es ideal para la influencia del aditivo en el comportamiento del producto durante la producción, dado que con una mayor concentración de emulsificante el esfuerzo necesario para que ocurra la deformación en el material es menor.
- La formulación evaluada con fosfatida presenta una reducción en la *rigidez* del sistema conforme se emplea una mayor concentración de aditivo. La razón de ello es la cobertura total o parcial de los sólidos presentes en la fase grasa que las envuelve, logrando así una distribución homogénea disminuyendo la fricción entre las partículas.

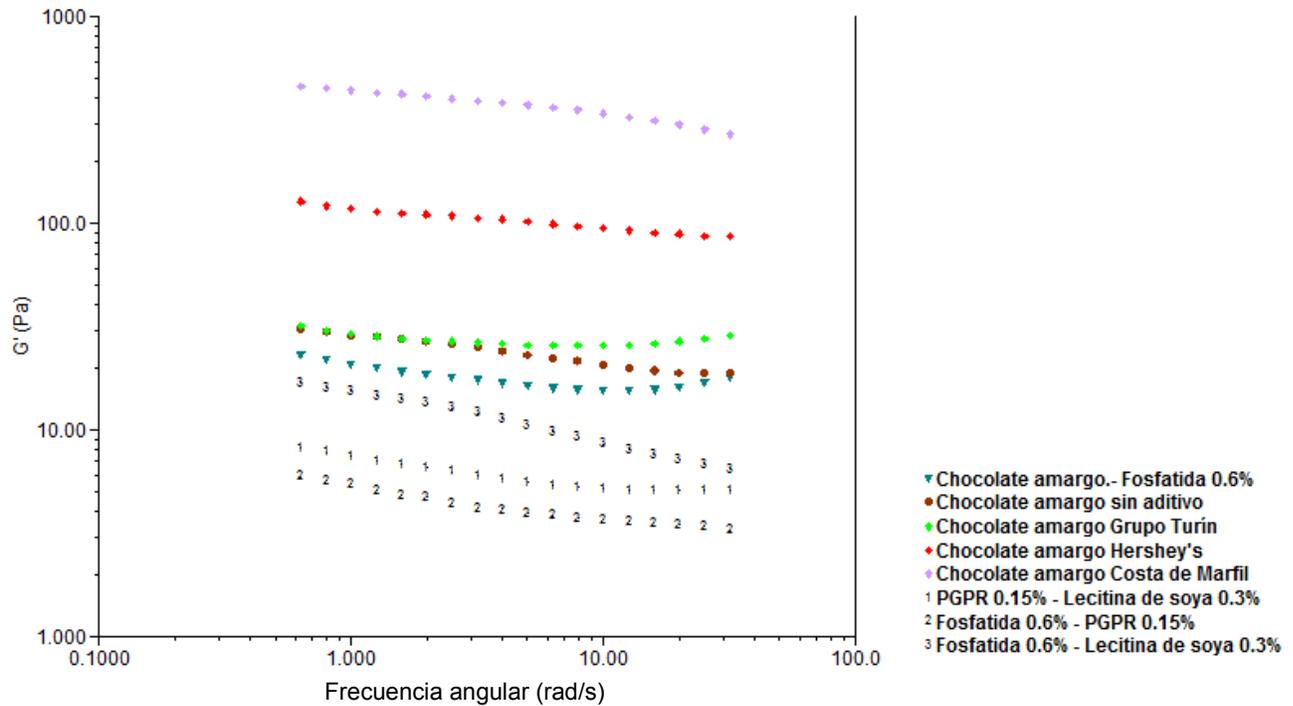


Gráfica 9.- Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida en la formulación y análisis de módulo complejo en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s]. Análisis a 40.0 °C.

En ésta gráfica donde se registra el comportamiento del módulo complejo, $|G^*|$, en función de la frecuencia angular (ω) se puede observar:

- Todas las muestras evaluadas presentan un incremento de $|G^*|$ por lo que la energía necesaria para su deformación estará aumentando a medida que aumenta la frecuencia, es decir, la temperatura disminuye.
- Todas las muestras requieren menor energía en bajas frecuencias o dicho de otra forma, altas temperaturas.
- Todas las muestras requieren mayor energía en altas frecuencias (bajas temperaturas).
- Las muestras con fosfatida al 0.4 y 0.6% en la formulación tienen un comportamiento muy similar a lo largo del intervalo de frecuencia utilizado.
- La muestra con fosfatida al 1.0% requiere menor energía para su deformación mientras que la muestra sin aditivo necesita mayor energía.
- Conforme la frecuencia angular aumenta todas las muestras se aproximan a valores de $|G^*|$ muy parecidos, por lo que la energía necesaria para la deformación también lo son.

Los resultados en las siguientes gráficas muestran el comportamiento reológico correspondiente a las mezclas de aditivos estudiados en las formulaciones en comparación de las obtenidas por muestras comerciales analizadas.



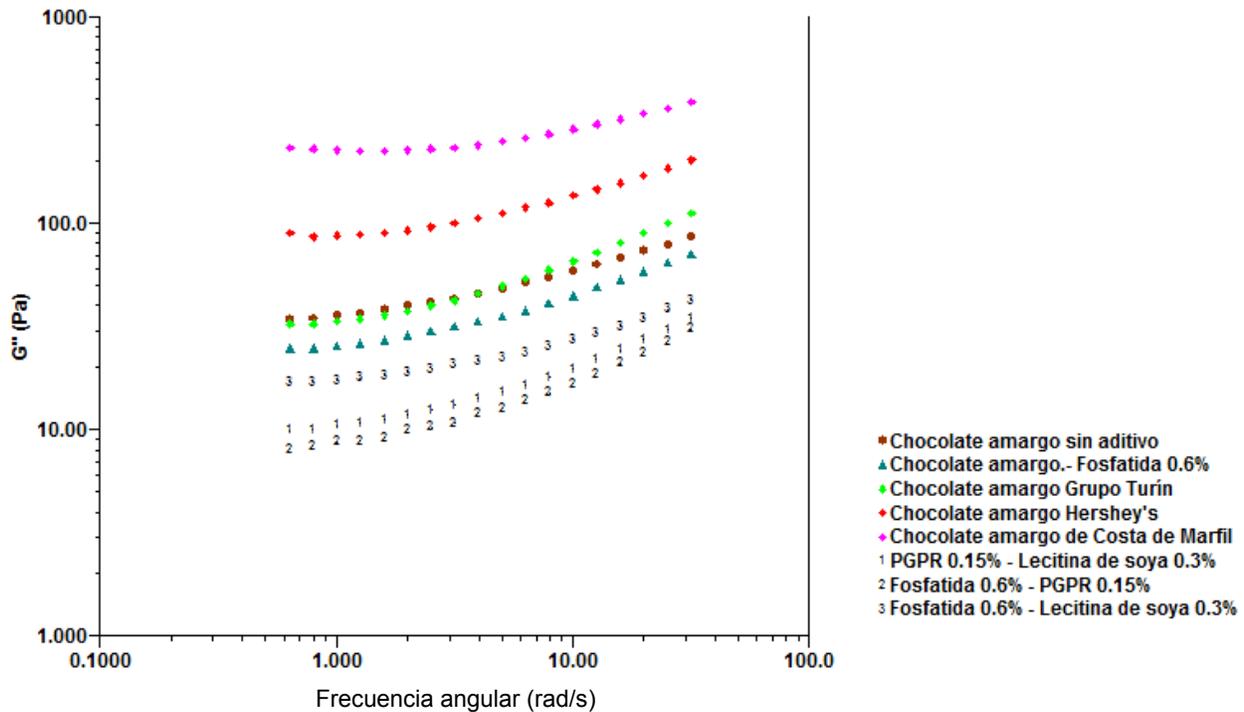
Gráfica 10.- Análisis de módulo elástico en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de las muestras de chocolate amargo 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales de chocolate amargo. Análisis a 40.0 °C.

En la Gráfica 10, se aprecia la comparación entre las muestras analizadas con los siguientes comportamientos:

- Las muestras comerciales de Turín, Hershey's y especialmente la muestra de chocolate amargo de Costa de Marfil, tienen un comportamiento en el módulo elástico mucho más elevado que la muestra que no presenta emulsificante alguno en la formulación.
- Como es de esperarse, al verse disminuido el valor del módulo elástico (Gráfica 10) conforme se aumenta la frecuencia angular, el módulo viscoso es más predominante en cada una de las muestras.

- La muestra del grupo Turín tiene un comportamiento similar a la muestra sin aditivo en la formulación en el intervalo de frecuencias bajas (altas temperaturas) que va de 0.4 rad/s a 2.0 rad/s. Mientras la muestra sin aditivo disminuye el valor del módulo elástico al aumentar la frecuencia, la muestra de chocolate Turín aumenta el valor del módulo. Esto quiere decir que el chocolate comercial, tiende a comportarse como sólido más que un líquido.
- La muestra analizada con 0.6% de fosfatida presenta un valor del módulo elástico mayor que las muestras con presencia de las mezclas de emulsificantes estudiadas. En el intervalo de 10.0 a 40.0 rad/s (bajas temperaturas) la muestra presenta un aumento en el valor del módulo elástico con una tendencia a sobrepasar el valor presentado por la muestra sin emulsificante.
- De las muestras con mezcla de emulsificantes, sólo la que contiene PGPR-lecitina de soya presenta un aumento en el valor del módulo elástico a frecuencias por arriba de 10.0 rad/s; esto quiere decir que tiene un comportamiento de sólido a temperaturas bajas.
- La mezcla de fosfatida-PGPR ocasiona la mayor disminución del valor del módulo elástico, siendo la muestra de chocolate amargo evaluada con menor comportamiento sólido.

Algunos autores (Glicerina, Balestra, Dalla Rosa, & Romani, 2013) (Johansson, 1992) observaron que un alto valor de energía de deformación almacenada durante el proceso de corte se relaciona con un alto nivel de interacción de fuerzas entre las partículas; esto conduce a un valor alto en el nivel de esfuerzo necesario para iniciar el flujo. El efecto de los emulsificantes sobre las partículas de azúcar es la reducción de la interacción de los sólidos en la estructura de la red conformada por los triglicéridos pertenecientes a la manteca de cacao, lo que implica la disminución del componente elástico.



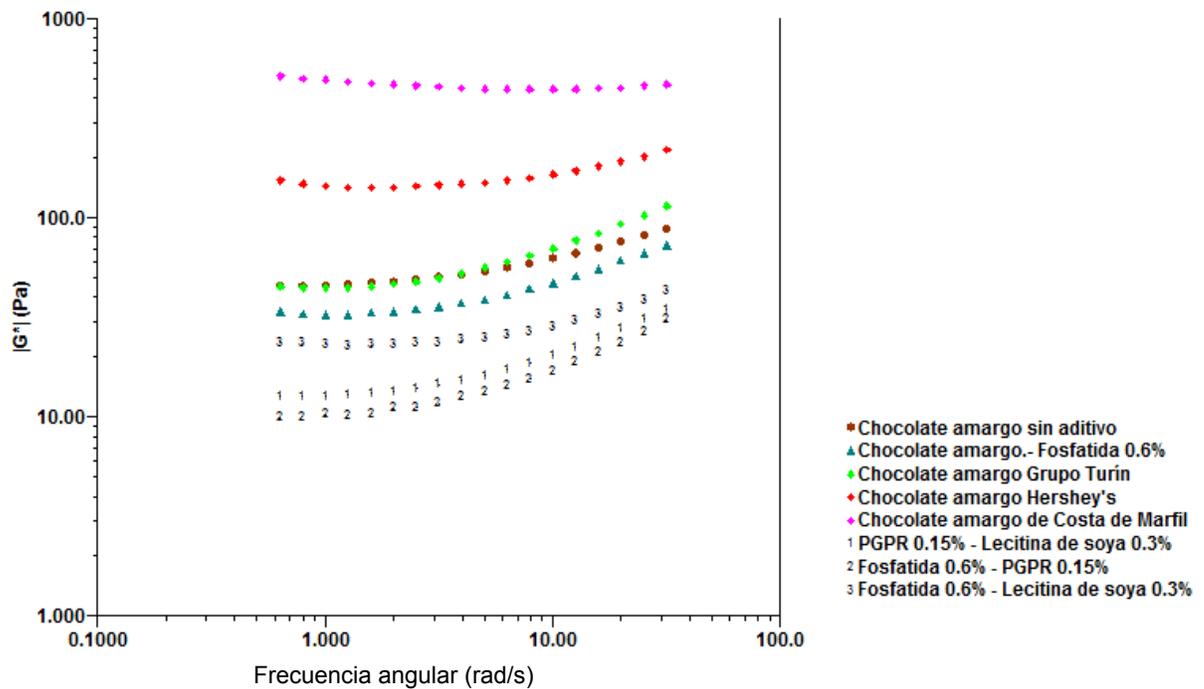
Gráfica 11.- Análisis de módulo viscoso en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de las muestras de chocolate amargo 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales de chocolate amargo. Análisis a 40.0 °C.

La Gráfica 11 permite observar el efecto de la frecuencia angular sobre el módulo de pérdida, mejor llamado módulo viscoso.

- La muestra con mayor valor del módulo viscoso es el chocolate comercial proveniente de Costa de Marfil (chocolate Amigo ®), cuyo valor incrementa al aumentar la frecuencia angular (temperaturas bajas).
- La muestra del grupo Turín tiene un comportamiento idéntico a la muestra de chocolate sin aditivo en un rango de 3.162 a 5.012 rad/s, sin embargo tiende a aumentar el valor del módulo viscoso en mayor grado al disminuir la temperatura, es decir al aumentar la frecuencia angular.
- Las muestras evaluadas con mezcla de aditivos (PGPR-lecitina de soya, fosfatida-PGPR y fosfatida-lecitina de soya) son las muestras con menor valor en el módulo viscoso, haciéndose evidente que éstas son las muestras que necesitan menor energía para deformarse independientemente de que al aumentar la frecuencia aumenta el módulo viscoso de todas las muestras de chocolate analizadas.

- Las muestras analizadas con presencia de las mezclas de emulsificantes presentan el valor más bajo en el módulo viscoso; las tres muestras presentan una tendencia a coincidir en el valor de G'' al sobrepasar los 30.0 rad/s.

Lo descrito anteriormente se ve descrito en la Gráfica 12, en donde el módulo complejo $|G^*|$, en dicha gráfica está representada la cantidad de energía total para causar una deformación en el material.



Gráfica 12.- Módulo complejo en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] de muestras de chocolate amargo con 0.6% de fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales.

- Por ende, la muestra de chocolate de Costa de Marfil es la que requiere una influencia de energía mayor para poder ser deformada a comparación de la muestra con Fosfatida al 0.6% y 0.3% de PGPR que requiere de una menor energía total para ocasionarle una deformación.
- En rasgos generales, todas las muestras analizadas incrementan la energía necesaria para la deformación al aumentar la frecuencia angular, es decir que a temperaturas más bajas la estructura interna del chocolate demanda

mayor energía para poder ser alterada, esto debido a que al disminuir la temperatura el material se conforma más rígido.

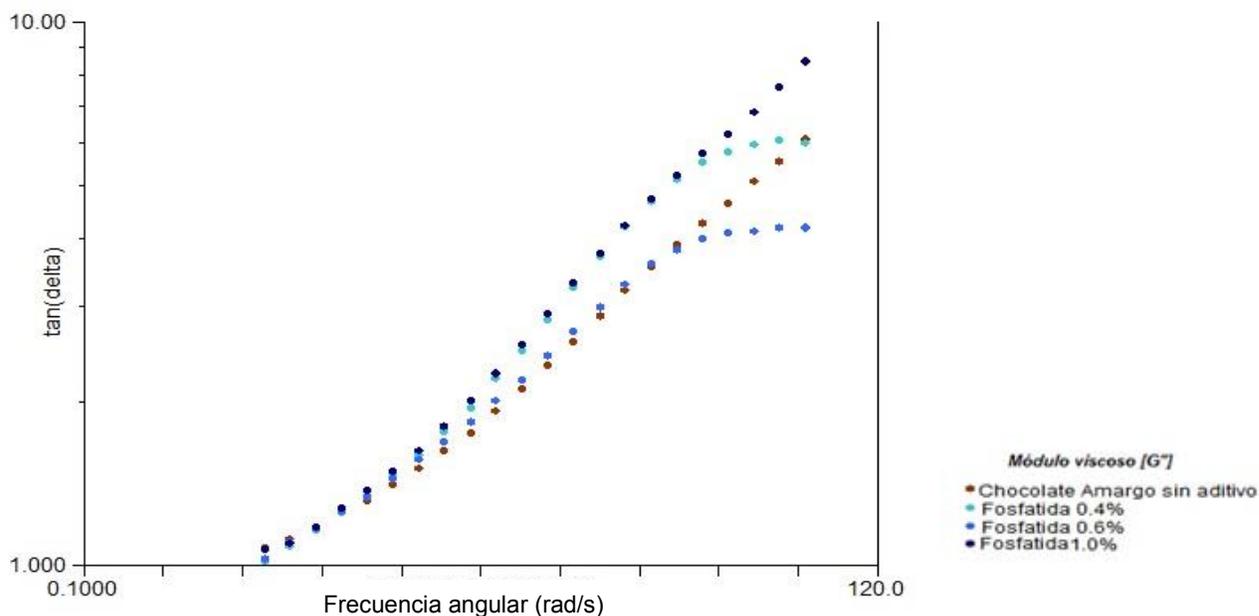
Cabe mencionar, que para analizar el comportamiento interno del chocolate se debe tener en cuenta la importancia de la operación de conchado, esto quiere decir que tanto la cocoa como el azúcar presentes en la formulación han sido expuestos a energía térmica y mecánica, dentro de los objetivos principales de dicha operación son la disminución de la humedad presente (que puede entorpecer la distribución de la manteca en todas la microestructura alimenticia del chocolate), la homogenización de los ingredientes empleados, la reducción de partícula dispersa en el producto y por último, pero de vital importancia, la generación de aromas y sabores en el perfil final del chocolate a empacar.

Considerando lo anterior, se está analizando una mezcla viscoelástica sin una guía de microestructura ideal para la formación de redes sólidas al momento de ser moldeado, esto conduce a la idea de presentar un chocolate fundido en una línea de producción con una característica crucial para la solidificación: un desorden estructural característico del polimorfismo de la manteca de cacao sin haber sido posteriormente temperado.

Al término del conchado, el arreglo estructural del chocolate es inestable debido al arreglo de los ácidos grasos que conforman la manteca de cacao, ésta materia grasa puede cristalizar en seis formas polimórficas diferentes (I-VI) y solo la forma V o β es la más estable para el chocolate comercial (Svanberg, 2011).

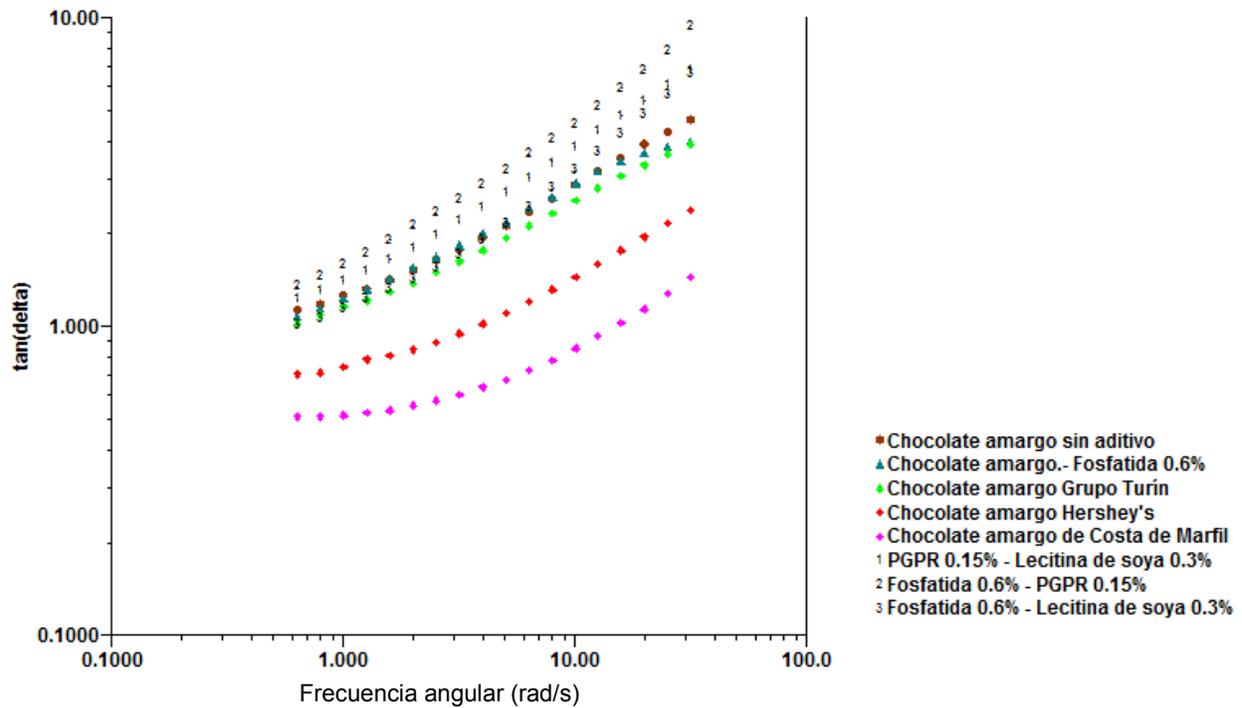
La forma β es un arreglo triple con un punto de fusión de 34 a 36 °C que se logra sólo con el temperado, por ende, las muestras evaluadas presentan un comportamiento reológico variable en función al módulo complejo puesto que el chocolate es susceptible a la deformación interna tras la prueba de oscilación teniendo formas polimórficas de cadena doble α , $\beta'1$ y $\beta'2$ en su mayoría.

Evaluando el comportamiento de las muestras y examinando el valor de $\tan(\delta)$ en función de la frecuencia angular (Gráfica 13) podemos decir que:



Gráfica 13.- Muestras de chocolate amargo con diferentes concentraciones de fosfatida y análisis de tangente (δ) en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s]. Análisis a 40.0°C

- Todas las muestras con presencia o no de emulsificante tienen un aumento en el comportamiento viscoso al incrementar la frecuencia angular (bajas temperaturas); tal comportamiento indica que el carácter viscoso predomina sobre el elástico teniendo los valores más altos en temperaturas más bajas.
- En el intervalo de 0.1 a 48 rad/s las muestras analizadas presentan un comportamiento mayoritariamente elástico para las 3 formulaciones realizadas, incluida la formulación sin presencia de emulsificante.
- Al aumentar la frecuencia, las muestras con un carácter viscoso mayor son las que contienen 0.4 y 1.0% de fosfatida, teniendo las mismas características la muestra con 0.6% que la muestra sin aditivo en la formulación.
- En el intervalo de 84 rad/s a 120 rad/s, la muestra sin aditivo y la que presenta 1.0% de fosfatida incrementan su comportamiento viscoso, mientras que las muestras con 0.4 y 0.6% indican una estabilidad en el comportamiento viscoso aunque aumente la frecuencia angular (o disminución de temperatura).



Gráfica 14.- Tangente (δ) en función de la frecuencia angular (ω) [rad/s] para muestras de chocolate amargo con 0.6% de Fosfatida, mezclas de emulsificantes y muestras comerciales. Análisis a 40.0°C.

La tangente delta es la relación entre el módulo viscoso y el módulo elástico, $\tan(\delta) = G''(\omega)/G'(\omega)$ ésta relación también es denominada factor de pérdida de energía, porque establece la relación entre la energía perdida durante la deformación en referencia a la energía almacenada (recuperable). Evaluando la Gráfica 14 del comportamiento de las muestras y examinando el valor de $\tan(\delta)$ en función de la frecuencia angular, se observa:

- A frecuencia angular de 10 rad/s el valor correspondiente a $\tan(\delta)$ es de 0.8479 para la muestra de chocolate de Costa de Marfil lo cual quiere decir que la energía perdida durante la deformación es 0.85 veces la energía almacenada durante la deformación, ésta última se recupera. En relación con las Gráficas 10 y 11, la energía de almacenamiento (G') es mayor a la de pérdida.

- La muestra con fosfatida y PGPR es la que presenta un valor de 4.567 en el valor de $\tan(\delta)$, a la misma frecuencia que el caso anterior (10 rad/s); por lo que se corrobora que existe un valor mayor en el módulo de pérdida (G'') y por ende tiene un carácter viscoso mucho mayor que el presentado por la muestra de chocolate de Costa de Marfil, el cual presenta un carácter elástico mayoritariamente.

Como es ya sabido, la utilidad de poliglicerol poliricinolato - PGPR es del tipo de coemulsificantes en donde la acción óptima en la reología analizada en la muestra tiene mayor impacto al ser empleado en combinación con un emulsificante base como son la fosfatida y la lecitina de soya.

Palsgaard® indica que la adición de PGPR sin la presencia de fosfatida o lecitina no es adecuada en una formulación normal de chocolate (Palsgaard, 2012); en este estudio (tanto en las curvas de flujo como las pruebas oscilatorias) el valor de los módulos de PGPR al 0.4% y las mezclas con los emulsificantes base muestran una disminución en el comportamiento viscoelástico coincidiendo con la reducción del valor umbral de Casson analizadas en las curvas de flujo.

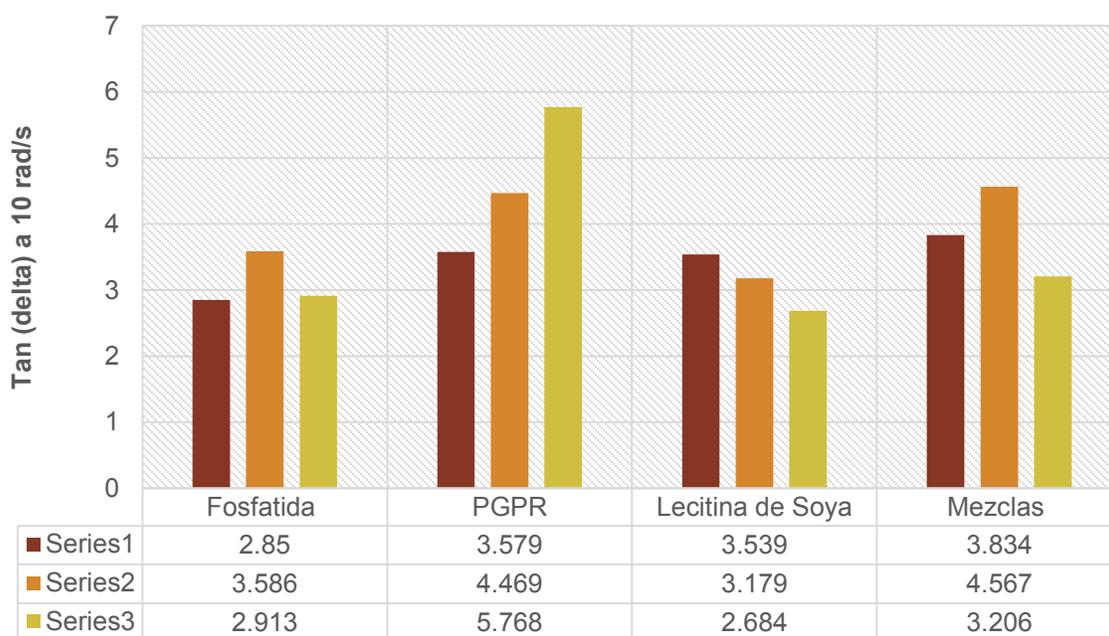
La dispersión en los resultados generalmente $G'' > G'$ señala que todas las muestras generan características distintas al ser sometidas a esfuerzo mecánico al que se ve sujeto el producto durante la línea de producción por ejemplo durante la operación de conchado en donde se expone el chocolate por mayor tiempo a manejo mecánico para la generación del perfil no solo sensorial sino reológico necesario para la posterior manipulación del producto final.

Al mismo tiempo, tener un mayor valor en el módulo viscoso que en el elástico, implica que los chocolates con presencia de aditivo se mantienen menos rígidos (o sólidos) en la configuración microestructural durante tiempos prolongados lo que conlleva a obtener chocolates con cristales de manteca de cacao menos ordenados; para verificar que el tamaño de los cristales de grasa formados son más homogéneos y si el tipo de cristal llega a tener mejor comportamiento es necesario comparar con muestras de chocolate amargo temperadas ya listas para el moldeado y posterior preparación para comercialización.

Analizando ahora la relación entre la energía disipada (G'') y la almacenada (G') por el chocolate es factible coincidir con la definición reológica expuesta por más de un autor (Afoakwa E. O., 2009), (Beckett S. T., 2008), (Minifie, 1980) (Palsgaard , 2012) (Schantz B. , 2005) en donde se expresa que el chocolate es un material viscoelástico.

El desfase presentado por cada una de las muestras evaluadas no presenta una variación significativa entre los diferentes emulsificantes analizados independientemente del análisis funcional de fosfatida en la formulación de chocolate amargo y las diferentes concentraciones empleadas en las muestras analizadas.

Observando la Gráfica 15, sólo el uso de fosfatida tiene una tendencia a 0 en el ángulo de desfase siendo esto una señal de que la muestra tienen un comportamiento reológico más cercano a un material elástico en contraste con el PGPR que hace al chocolate un material con características viscosas más predominantes.



Gráfica 15.- Ángulo de desfase en las muestras de chocolate con distintos emulsificantes en la formulación. Serie de menor a mayor concentración de emulsificante. Serie 1 menor concentración de emulsificante, Serie 3 mayor concentración de emulsificante. Mezcla (serie 1): PGPR-lecitina de soya. Mezcla (serie 2): fosfatida-PGPR. Mezcla (serie 3): fosfatida-lecitina de soya. Análisis a 40.0°C.

Como ya se ha descrito en la Gráfica 15, la actividad sinérgica entre los emulsificantes base y el PGPR (coemulsificante) da como resultados un comportamiento reológico diferente al presentado en las muestras de producto con la presencia de uno solo de ellos. Mirando de nuevo la gráfica 15, el ángulo de desfase de la mezcla de fosfatida-lecitina (Serie 3) tiene un perfil elástico mientras que la muestra con fosfatida-PGPR (Serie 2) es de carácter viscoso dentro de la zona viscoelástica general que caracteriza al chocolate reológicamente.

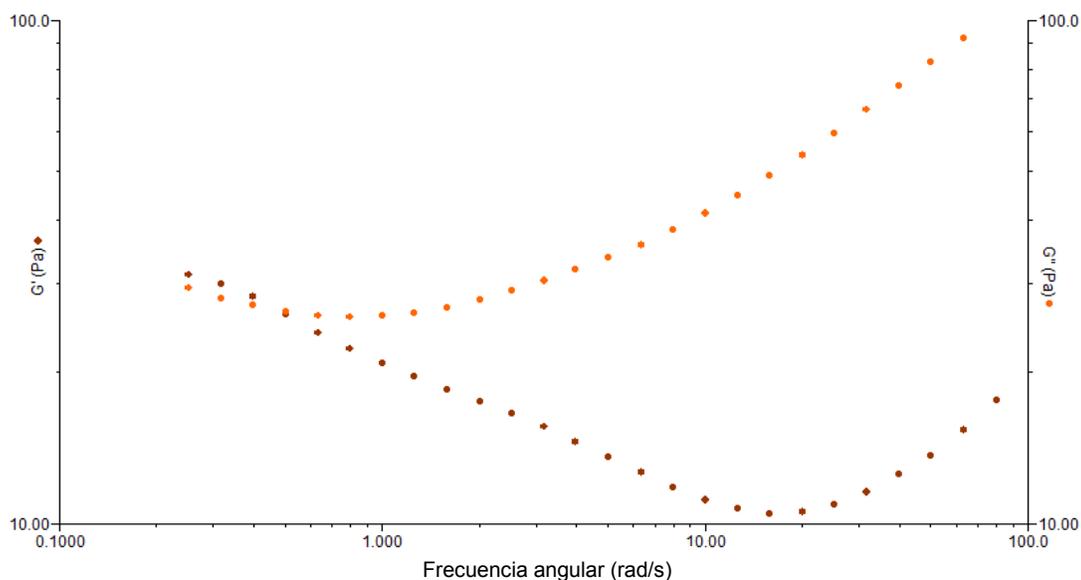
Tiempo característico (λ) de las muestras evaluadas

Otra forma de comprender el comportamiento reológico del chocolate evaluado es definiendo el tiempo característico del material.

Cuando la muestra es sometida a deformaciones, aparecen tensiones internas debido a un cambio de posición u orientación de las moléculas en la microestructura del material, aun cuando no se produzca un cambio de estructura, las tensiones necesitan cierto tiempo para desaparecer. Este tiempo, también llamado tiempo de relajación, es característico del material para adaptarse a la deformación.

Como se ha analizado en las curvas de flujo, la viscosidad de las muestras analizadas depende del esfuerzo o del gradiente de velocidad en el rango estudiado, con lo cual se confirma que el comportamiento reológico del chocolate amargo es no newtoniano.

El tiempo característico es obtenido de la intersección que presentan entre si el módulo elástico (G') y el módulo viscoso (G''). La Gráfica 16 presenta el análisis reológico para la obtención del tiempo característico de la muestra de chocolate amargo con 0.4% de fosfatida en la formulación.



Gráfica 16.- Módulo elástico (G') y módulo viscoso (G'') en función de la frecuencia angular. Muestra de chocolate amargo con 0.4% de fosfatida en la formulación. Análisis a 40.0 °C.

En la Gráfica 16 se aprecia claramente la intersección entre G' y G'' en 0.5012 rad/s; el inverso de dicho valor hace saber que la microestructura de la muestra con fosfatida al 0.4% de la formulación necesita 2.0 segundos para adaptarse a la deformación sufrida durante el intervalo de 0.2 a 100.0 rad/s estudiado. Siguiendo la misma metodología se reportan en la Tabla 23 tabula los tiempos característicos de las muestras de chocolate amargo analizadas. (Gráficas fosfatida en Anexo II)

Tabla 23.- Tiempos característicos de las muestras de chocolate amargo estudiadas.

Muestra	Frecuencia angular en el cruce rad/s	Tiempo característico (s)
Sin emulsificante	0.3162	3.16
0.4% fosfatida	0.5012	2.00
0.6% fosfatida	0.5012	2.00
1.0% fosfatida	0.3981	2.51
0.15% PGPR	0.1269	8.00
0.30% PGPR	-	-
0.40% PGPR	-	-
0.3% lecitina de soya	0.3981	2.51
0.4% lecitina de soya	1.0000	1.00
0.6% lecitina de soya	0.7943	1.26
0.15%PGPR- 0.3% lecitina de soya	0.3162	3.16
0.6% fosfatida - 0.15% PGPR	-	-
0.6% fosfatida - 0.3% lecitina de soya	0.6310	1.60

Como se ha visto en la Tabla 23, los tiempos de relajación son distintos para cada una de las muestras estudiadas. Teniendo en cuenta la relación del tiempo con la deformación sufrida por el material durante el análisis se puede decir lo siguiente:

- Al depender la viscosidad del gradiente de velocidad utilizado, el comportamiento de las muestras es no newtoniano.
- La muestra que no presenta emulsificante en la formulación tiene el mismo tiempo de relajación que la muestra con la mezcla de PGPR-lecitina de soya, sin embargo al remontarse al análisis anterior, la muestra sin aditivo alguno requiere mayor fuerza para poder ocasionar una deformación en el material analizado.
- La formulación con 1.0% de fosfatida presenta el mayor comportamiento elástico entre las muestras con dicho aditivo presente en el chocolate analizado.
- La muestra con PGPR al 0.15% presenta el mayor tiempo de relajación entre las muestras estudiadas, siendo el chocolate con mayor carácter viscoelástico.
- La muestra con 0.4% de lecitina es la única con un tiempo de relajación aproximadamente igual a 1.00 ($\lambda \cong 1.00$) lo que quiere decir que el material posee una alta viscosidad al estar sometido a esfuerzos bajos y al incrementar el esfuerzo la viscosidad decrece, es decir un claro comportamiento viscoelástico justo como se ha descrito en la Gráfica 3 de la Sección I (evaluación de las curvas de flujo). Este comportamiento corresponde a un material tixotrópico, lo cual hace referencia a un material viscoelástico, que como ya se explicó, la viscosidad disminuye con el tiempo de aplicación del esfuerzo esto debido a que las macromoléculas (en este caso los triglicéridos de la manteca de cacao) presentes en la estructura del material establecen fuerzas de unión débiles por lo que son fáciles de destruir en un tiempo finito cuantificable.
- Las muestras con menor tiempo de relajación son lecitina de soya 0.4%, 0.6% y la mezcla de fosfatida-lecitina de soya, cuyo comportamiento es más viscoso.

III. Presentación comercial del chocolate amargo.

El chocolate formulado fue sometido a temperado en las tres etapas de temperatura correspondientes: 46, 26 y 32 °C durante 15 minutos cada periodo (Anexo II).

Posteriormente fue moldeado (Figura 42) y envuelto en papel tipo glassine grado alimenticio a una tinta como empaque primario y cajas de cartón corrugado a una y dos tintas como empaque secundario. Los parámetros de calidad evaluados en las piezas de chocolate amargo con presencia de fosfatidos de amonio en la formulación se encuentran redactados en el Anexo II.

Cabe mencionar que el producto debe presentar una tabla nutrimental de lo ofrecido al consumidor en función de la NOM-051-SCFI/SSA1-2010; cumpliendo con lo establecido como nombre del producto, contenido neto, porciones en el empaque, información social de la empresa responsable del producto, línea de rastreo del departamento de Control de Calidad (conocido como Re-Call) y la lista correspondiente de los ingredientes con la respectiva advertencia de posibles alérgenos presentes en el producto.



Figura 42.- Figuras de chocolate moldeado listo para consumo.

La Figura 42 presenta las distintas piezas de chocolate amargo elaboradas con los lotes de las mezclas analizadas.

V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye lo siguiente:

1. En el rango de condiciones experimentales investigado, se sabe que el chocolate es una dispersión de sólidos en una matriz grasa, que fundido, presenta un comportamiento de líquido no newtoniano al presentar una viscosidad distinta a diferentes velocidades de corte.
2. El chocolate con presencia o no de emulsificantes es un material viscoelástico.
3. El uso de fosfatida en la formulación de chocolate amargo presenta una ventaja en la disminución de la viscosidad plástica de Casson sin variación significativa en la viscosidad con las concentraciones estudiadas, sin embargo se obtienen valores por arriba de las propiedades reológicas que se logran al usar los aditivos comerciales más comunes: PGPR y lecitina de soya.
4. Considerando el impetuoso afán por trabajar con un chocolate de fácil transporte en la línea de producción reduciendo la viscosidad, es recomendable:
 - La mezcla con PGPR al 0.15% con lecitina de soya al 0.3%, que sigue siendo ideal para la modificación reológica del chocolate en su comportamiento industrial disminuyendo en mayor grado la viscosidad del producto.
 - La fosfatida al 0.6% en sinergia con PGPR al 0.15% representa una alternativa para la optimización de flujo del chocolate en la línea de producción.
5. La mezcla de lecitina de soya (0.3%) y PGPR (0.15%) es la muestra más cercana al comportamiento del chocolate comercial Turín.
6. El chocolate Amigo procedente de Costa de Marfil, presentó la viscosidad más baja en comparación a las muestras analizadas de las formulaciones con lecitina de soya. Este comportamiento está íntimamente relacionado con las condiciones de proceso como tiempo de conchado y la formulación particular de la industria.
7. Las muestras con fosfatida tienen valores de G'' más altos que las muestras con PGPR o Lecitina de soya.

8. La presencia de fosfatida en el chocolate amargo conduce a una reducción de la energía total necesaria para la deformación ($|G^*|$ tiende a disminuir) conforme se aumenta la concentración del aditivo, respuesta de la cobertura total de los sólidos presentes con la manteca de cacao, logrando una distribución homogénea que disminuye las fuerzas de fricción entre las partículas gracias a la presencia del aditivo.
9. La interacción entre los triglicéridos y el emulsificante, dan lugar a la variación de los valores de los módulos, por ello el acomodo de esta red es de vital importancia para el entendimiento de la tendencia de flujo del producto analizado.

Una vez analizado el papel funcional de la fosfatida en la reología del chocolate es necesario considerar que la elección de emulsificantes en la formulación del chocolate amargo depende de las condiciones de procesamiento y las propiedades deseadas del producto. Sin embargo, se ha señalado una nueva alternativa en la formulación para la adaptación de las propiedades de flujo del chocolate: la mezcla de fosfatida-0.6% con PGRP-0.15%.

La información obtenida representa una oportunidad a la integración del conocimiento estricto del chocolate en la optimización de la industria chocolatera de pequeñas y medianas empresas que busquen una alternativa de libre competencia en el mercado.

Con este estudio, se ha logrado una formulación muy similar a un producto comercial con estándares de calidad altos, muestra de que la capacidad de producción a pequeña escala puede ser muy apegada a lo ofrecido por la gran industria brindando oportunidades de innovación que al consumidor puedan satisfacer.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Afoakwa, E. O. (2007). Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate; a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 290-298.
- Afoakwa, E. O. (2009). Comparision of rheological models for determining dark chocolate viscosity. *International Journal of Food Science & Technology*, 44, 162-167.
- Andrade, M. P. (2011). *Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región Sur-Sureste de México: Trópico Húmedo 2011. Paquete tecnológico Cacao (Theobroma cacao L.) Producción de planta*. Huimanguillo, Tabasco.: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, (INIFAP).
- Apyos y Servicios a la Comercialización Adropecuaria. (1995). Tabasco y el cacao; crónica de una tradición. *Claridades Agropecuarias*(16), 4-5.
- Attolini L., A. (1 de Abril de 2011). Cuantas, dares y tomares del cacao: Delicia, convite, rito mesoamericano. Aspectos Antropológicos. *Revista Digital Universitaria*, XII(4).
- Beckett, S. (1994). *Fabricación y utilización industrial del chocolate* (Primera ed.). Zaragoza, España: Acribia, S. A.
- Beckett, S. T. (2008). The Science of Chocolate. En S. T. Beckett, *The Science of Chocolate* (2° ed., págs. 11-14). York, Reino Unido: RSC Publishing.
- Bird, B. (1986). *Fenómenos de Transporte. Estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento*. Barcelona: Repla, S. A.
- Coe, S. D. (2013). La verdadera historia del Chocolate. México, D. F.: Fondo de cultura Económica.
- Comité Estatal Sistema Producto Cacao en Chiapas, CESPCC. (2012). *Plan Rector Cacao Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Do, T. A. (2011). Structural characteristics of cocoa particles and their effect on the viscosity of reduced fat chocolate. *LWT-Food Science & Technology*, 44, 1207-1211.
- FAO. (Agosto de 2014). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado el 27 de Agosto de 2014, de <http://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/es/>
- Glicerina, V., Balestra, F., Dalla Rosa, M., & Romani, S. (2013). Rheological, textural and calorimetric modifications of dark chocolate during process. *Journal and Food Engineering*(119), 173-179.

- Gobierno de Veracruz; Dirección de promoción. . (28 de Mayo de 2012). *Veracruz incomparable*. Recuperado el 29 de Julio de 2014, de http://veracruz.mx/nota/la_leyenda_del_cacao
- Gobierno Regioinal Piura. (2007). *Prácticas de Control de Calidad de Cacao en Centro de Acopio*. Piura, Perú: Artech Media Comunicadores.
- Graef, V., & etal. (2011). Chocolate yield stress as mesured by oscillatory rheology. *Food Research International*(44), 2660-2665.
- ICCO, I. C. (2012). *Annual Report 2011/2012*. Londres, Inglaterra.
- International Cocoa Organization, ICCO. (2011/2012). *Anual Report*. Londres, Inglaterra: ICCO.
- Johansson, D. (1992). The influence of food emulsifiers on fat and sugar dispersions in oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*(69), 705-717.
- León, J. (2000). Botánica de los cultivos tropicales. En J. León, *Botánica de los cultivos tropicales* (págs. 104-109). San José, Costa Rica: IICA.
- Lina Svanberga, e. a. (2011). Effect of pre-crystallization process and solid particle addition. *Procedia Food Science*, I(11), 1910-1917.
- MALVERN INSTRUMENTS . (2012). *A Basic Guide to Particle Characterization*. Malvern Instruments Worldwide.
- Martínez, P. M. (1975). *Los Dioses en los códices Mexicanos del Grupo Borgia. Una investigación iconográfica*. (Primera, tercera reimprección. ed.). México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Minifie, B. (1980). *Chocolate, cocoa and confectionary Science and Technology* (Tercera ed.). Nueva York, EEUU: Aspen Publicaion.
- Norma Oficial Mexicana 186- SSA1/SCFI-2007 Cacao, chocolate y productos similares derivados del cacao.
- Norma mexicana 343-SCFI-2007. Manteca de cacao y especificaciones.
- Norma mexicana 352-SCFI-S-1980. Cacao en grano fermentado.
- Mott, L. R. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta ed.). México, D. F.: Pearson Educación.
- Mugüerza, P. (2011). *Estudio de emulgentes comerciales en la formulación de Chocolate amargo*. México, D.F.: UNAM.
- Palsgaard . (2012). The importance of expanded rheology information and emulsifier functionality in chocolate production. *Technical paper*, 1-7.
- Palsgaard A/S. (s.f.). *Palsgaard AMP 4448*. EEUU: Palsgaard. Recuperado el 2014

- Ramírez Gómez, M. M. (2011). *Confitería, de lo artesanal a la tecnología* (Primera ed.). Aguascalientes, Aguascalientes., México: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Rawle, A. (2012). *Basic Guide to particle Characterization*. England: Malvern Instruments.
- Recinos, A. (2005). *Popol Vuh* (Segunda ed.). México, D. F.: Fondo de Cultura Económica.
- Rector, D. (2000). Chocolate. Controlling flow. Benefits of polyglycerol polyricinoleic acid. *The Manufacturing Confectioner*, V(80), 63-70.
- Reineccius, G. E. (1972). Flavor Ressearch. *Agricultural and Food Chemistry*, VI(20), 202-206.
- Schantz, B. (2005). Influence of lecithin-PGPR blends on rheological properties of chocolate. *Lebensm:- Wiss. U.- Technology.*, 38, 41-45.
- Schantz, S. e. (2005). Influence of Lecithin - PGPR blends on the rheological properties of chocolate. *Lebensmittel-Wissenschaft und- Technologie*(38), 41-45.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, SCFI. (2007). *NMX-F-343-Alimentos. Manteca de Cacao, Especificaciones*. México, D.F.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2014). *Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, SAGARPA*. Recuperado el 15 de Julio de 2014, de <http://www.siap.gob.mx/agricultura-produccion-anual/>
- Steffe, J. F. (1992). *Rheological Methods in Food Process Engineering* (Segunda ed.). Michigan, EEUU: Freeman Press.
- Svanberg, L. (2011). Effect of pre-crystallization process and solid particle addition. *Procedia Food Science*, I(1), 1910-1917.
- TA Instruments. (2004). Training Seminars Rheology. *Training Seminars Rheology* (págs. 4-6). EEUU: TA Instruments.
- Urquhart, D. H. (1963). *Cacao*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O. E. A.
- Velayos, J. L. (2009). *Medicina del sueño; enfoque multidisciplinario*. Barcelona, España: Editorial Médica Panamericana.

VII. ANEXOS

Anexo I. Control de calidad de materias primas

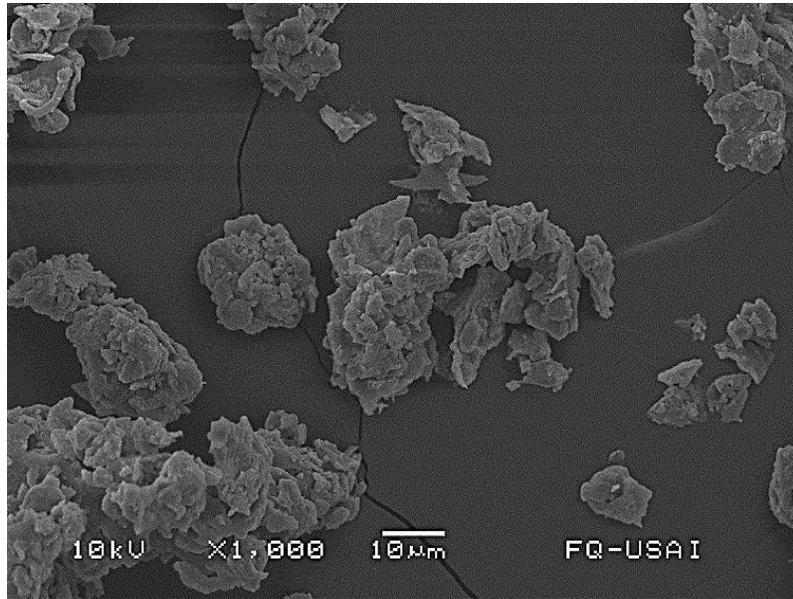
Ficha 1. Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.

Insumo: Cocoa estándar		Origen: Grupo Turín®
Fecha de muestreo: 15 de Agosto 2014		Precio: \$250 / kg
Lote adquirido: 6 kg	Obs: Lugar limpio, no permiten tocar la materia prima.	
Pruebas realizadas		
Humedad:		
Método: Termobalanza.		
Tamaño de partícula d(0.9): 126.207 µm		
d(0.5): 16.587 µm		
Método: microscopía electrónica de barrido		
Difracción de rayos láser.		
Contenido graso: 11 – 22 % m/m		
Norma de referencia: NOM-186-SSA1/SCFI-2002		

El análisis de la distribución del tamaño de partícula de la cocoa fue evaluada por dos métodos: microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos láser. Tal análisis es un apoyo para estandarizar la distribución del tamaño de partícula del chocolate analizado garantizando el recubrimiento de las mismas con la materia grasa presente en la formulación.

El análisis por microscopía electrónica de barrido señala una distribución de tamaño de partícula en un rango de 10 a 50 micras de diámetro.

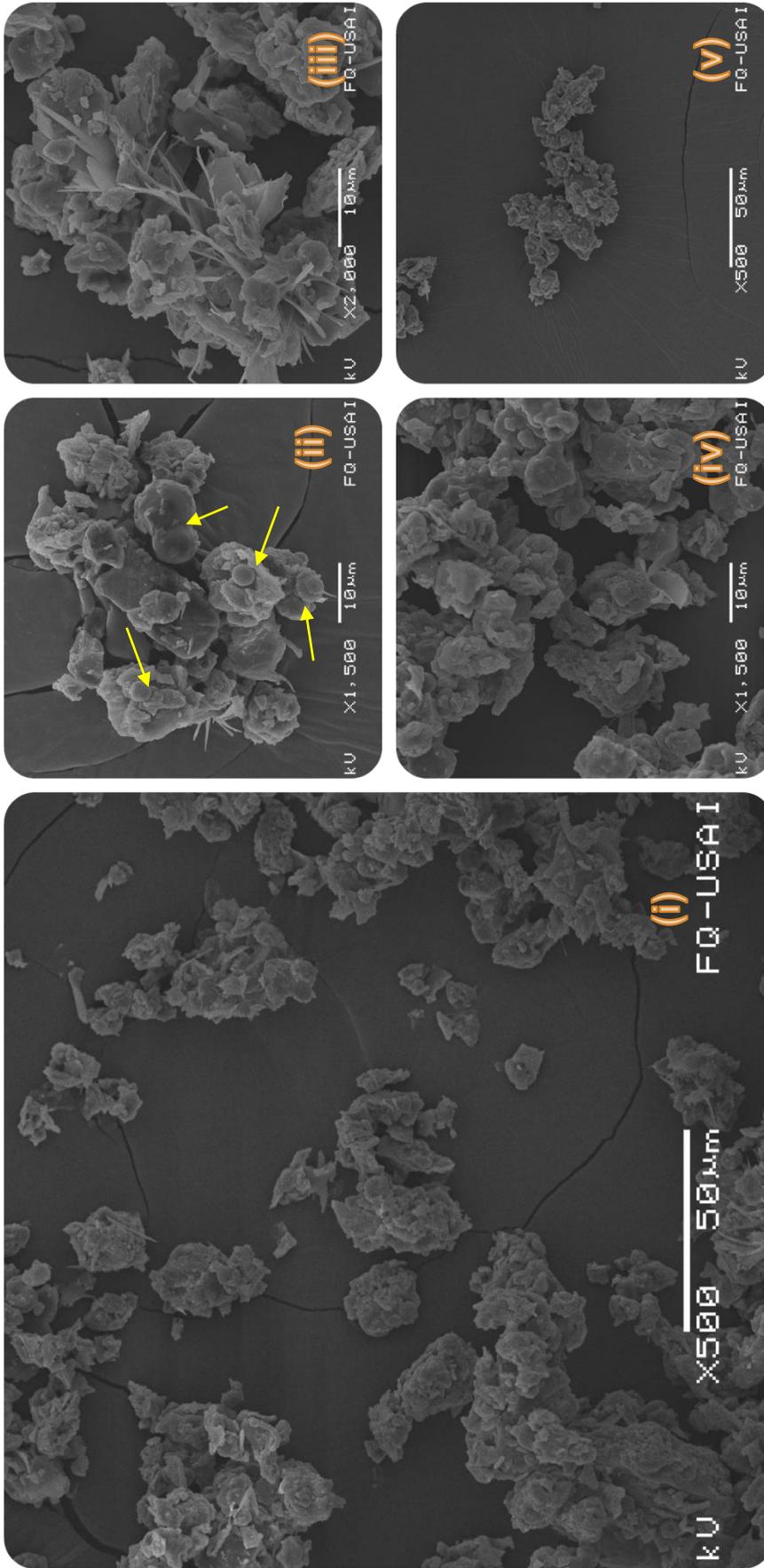
Como se puede observar en la MEB 1, la partícula de cocoa es de morfología irregular característico del resultado de la molturación del grano de cacao principalmente, así como el método de pulverización de la torta de cocoa obtenida después de la obtención de la manteca de cacao.



MEB 1.- Partícula de cocoa, distribución y morfología.

Como ha sido estudiado por Do (2011), un chocolate formulado con sólidos de cacao de alto contenido graso, contiene menos grasa libre que afecte el comportamiento de la viscosidad del chocolate fundido, ya que solo la grasa libre contribuye a la fluidez del chocolate, es por ello que el trabajo experimental con cocoa estándar estabiliza la actividad que la manteca de cacao en formulación tiene en efectos del flujo.

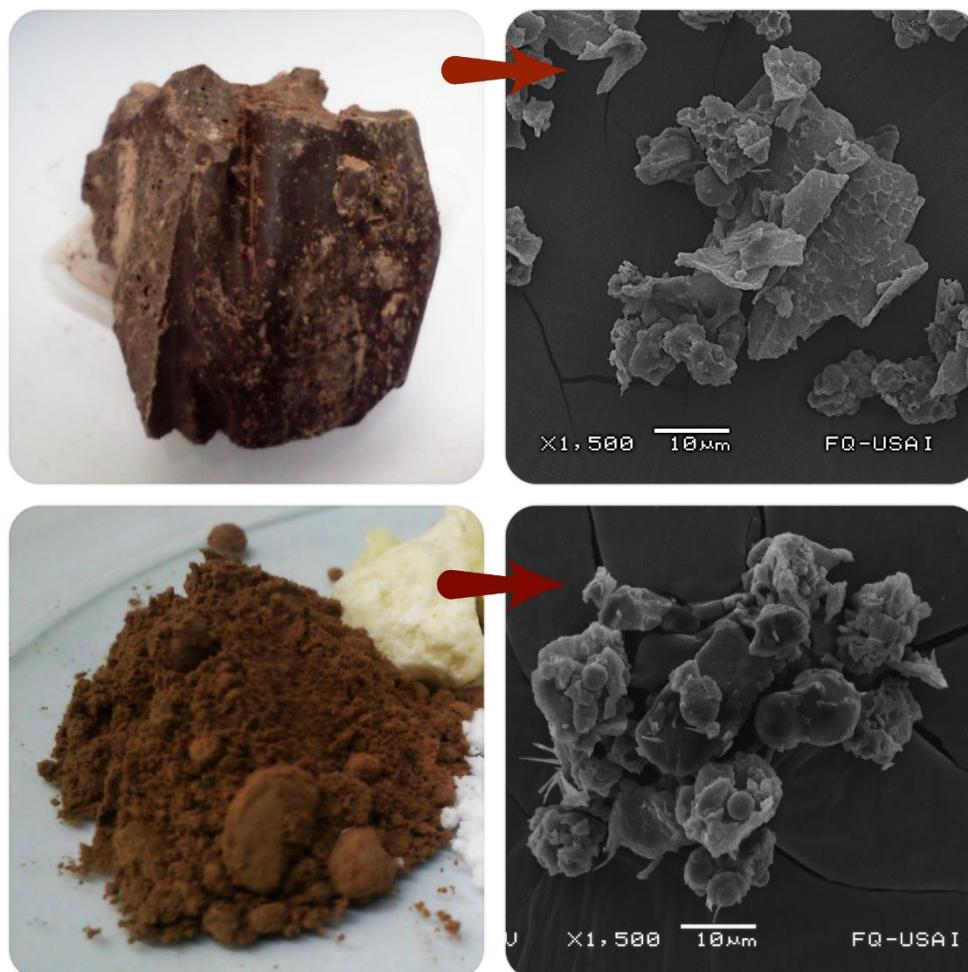
En la MEB 2, se aprecian claramente glóbulos de manteca de cacao presentes en la cocoa, así como las distintas superficies morfológicas de las partículas de cacao. Las muestras de cocoa fueron colocadas sobre el soporte de análisis y recubiertas por una pulverización catódica de oro.



MEB2.- Micrografías de cocoa estándar. (i) Morfología de partículas de los sólidos de cacao; como se puede apreciar no tienen forma definida y presentan bordes afilados característicos del proceso de molienda al que fue sometido el grano de cacao. (ii) Partículas de cacao aglomeradas por la presencia de glóbulos grasos -manteca de cacao- (iii) – (iv) Sólidos de cacao de 10 micras a diferente aumento con morfologías distintas, presentes en un mismo lote (v) Partícula de cacao de mayor tamaño enfocada por MEB.

La estructura interna de los sólidos de cacao que fueron mostrados en la MEB 2, corresponden a la proyección de la imagen de una partícula y son representativas de las partículas en la muestra analizada. El conocimiento de muchos de los investigadores del chocolate, muestra evidencia directa de que la cocoa (es decir los sólidos de cacao), está compuesta por sólidos porosos y dichos poros son lo suficientemente grandes para permitir la entrada y contacto con la manteca de cacao (MEB 2-ii).

Gracias al análisis por microscopía electrónica de barrido, se puede diferenciar la forma de las partículas de cacao de un licor de cacao obtenido por molienda (MEB 3) y las partículas de la cocoa estándar comercial.



MEB 3.- Micrografía a 1.500. Partícula característica de licor de cacao obtenido de la molienda del grano fermentado y seco (arriba) y partícula de cocoa comercial (abajo).

Como se pudo apreciar en la MEB 3, el proceso de molienda al que se somete el grano determina la morfología de las partículas; al comparar ambas partículas del mismo tamaño (10 μm) y al mismo aumento (X1500), la partícula del grano molturado en un molino de piedra (MEB 3.- arriba) presenta una configuración superficial en hojuela, resultado de la ruptura grotesca del grano durante el proceso de molienda; sin embargo la superficie de los sólidos de la cocoa comercial se aprecia mucho más estilizado y redondeado, forma conocida como <<modular>> y presentan en la superficie muchos pliegues redondeados, pues el proceso de molienda y pulverización de la torta de cacao es completa y controlada para su producción.

La importancia de la forma de las partículas presentes en la formulación del chocolate, en este caso mayoritariamente las de la cocoa; es la repercusión sobre las propiedades de recubrimiento de grasa de las partículas durante el conchado y finalmente en las propiedades de fluencia del producto en la línea de producción.

La forma de la partícula tiene un profundo efecto en el comportamiento de una suspensión, aquí parece que los resultados de viscosidad son dependientes de la forma de las partículas y se puede ver reflejado en el análisis de diferentes sólidos de cacao analizados, como ya se mencionó el licor de cacao y la cocoa estándar empleada en el análisis experimental.

El análisis por difracción de rayos láser es un respaldo más certero en la medición de la distribución del tamaño de partícula (PSD); los histogramas de volumen de la muestra analizada en Mastersizer 2000 de Malvern Instruments (PSD 1), muestran un PSD en un rango promedio de $126.702 \pm 10.773 \mu\text{m}$ [d (0.9) o 90% de la muestra]. En promedio, las partículas de cocoa tienen un área superficial media (D [3,2]) de 6.763 con una desviación estándar de 1.070 μm .



MASTERSIZER 2000

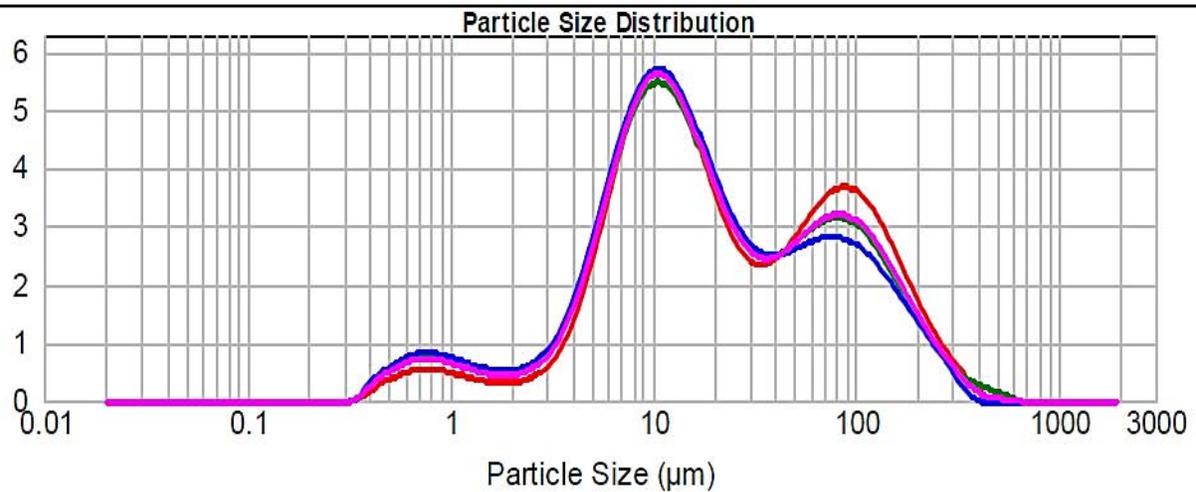
Result Analysis Report

[PSD 1] Muestra: Sólidos de cacao (cocoa estándar Grupo Turín ®)

Fecha de análisis: Agosto 15, 2014 Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación

Modelo de análisis:	General	Sensibilidad:	Normal
IR de partícula:	Absorción:	Intervalo de tamaño:	Disolvente:
1.520	0.1	0.020 a 2000.000 µm	Etanol
Unidades de resultado: volumen	Área superficial específica:	Área Superficial D[3,2]	Volumen D[4,3]
	0.887 m ² /g	6.6763 µm	45.268 µm

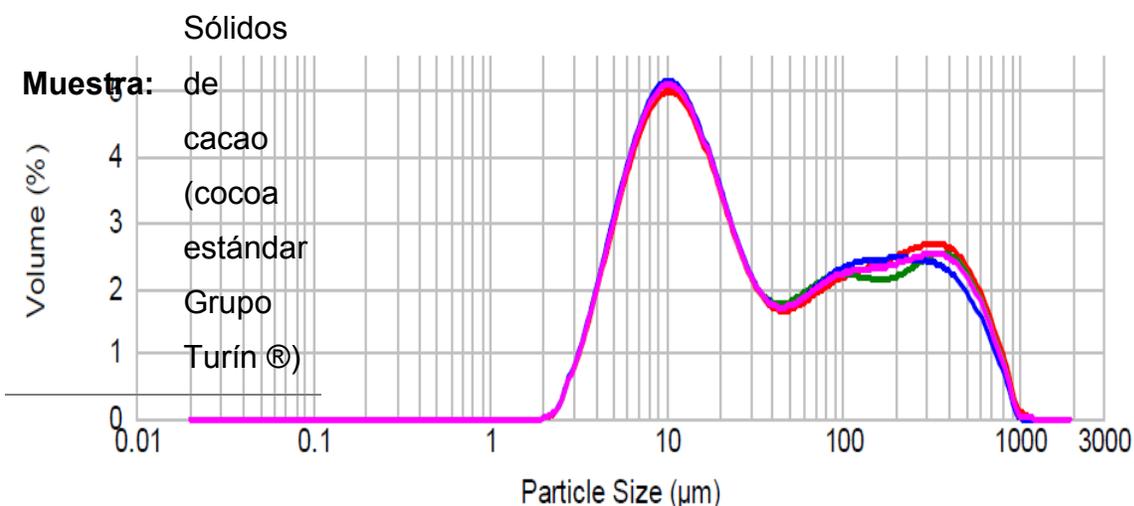
d(0.1): 4.129 µm d(0.5): 16.587 µm d(0.9): 126.702 µm



Repetición	Área Superficial Específica (m ² /g)	D[3,2] (µm)	D[4,3] (µm)	d(0.5) (µm)	d(0.9) (µm)
1era	0.741	8.092	49.848	18.572	137.019
2da	0.939	6.389	45.727	16.374	125.925
3ra	0.981	6.117	40.228	15.234	115.476
Promedio	0.887	6.866	45.268	16.727	126.140
Desviación estándar	0.128	1.070	4.826	1.697	10.773

Se procedió a la elaboración de las muestras de chocolate amargo para análisis reológico con cocoa estándar del Grupo Turín® con un tamaño de partícula mucho menor que la partícula obtenida en la molienda del grano de cacao en molino de rodillos de piedra (PSD 2). La cocoa estándar empleada, reduce y homogeniza el comportamiento y la influencia de los sólidos de cacao en las propiedades de fluencia de la formulación de chocolate amargo en la experimentación.

[PSD 2] Muestra: Sólidos de cacao (obtenido por molino de rodillos)



Repeticición	Área Superficial Específica (m ² /g)	D[3,2] (µm)	D[4,3] (µm)	d(0.5) (µm)	d(0.9) (µm)
1era	0.395	15.172	121.473	24.456	397.321
2da	0.409	14.641	112.781	22.444	379.252
3ra	0.412	14.578	106.811	22.236	346.607
Promedio	0.405	14.800	113.689	22.986	374.889
Desviación estándar	±7.408x10 ⁻³	±0.266	±6.020	±1.001	±20.987

Distribución de tamaño de partícula de licor de cacao obtenido por molienda del grano Theobroma cacao en molino de rodillos de piedra. El tamaño de partícula en el d(0.9) de la muestra es de 374.889 ± 20.987, más que el doble del tamaño de partícula de los sólidos de cocoa estándar.

Ficha 2. Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.

Insumo: Azúcar glass		Origen: Bremen ®
Fecha de muestreo: 19 de Agosto 2014		Precio: \$ 36/ kg
Lote adquirido: 2 kg	Obs: Empaque cerrado.	
Pruebas realizadas		
Humedad:		
Método: Termobalanza.		
Tamaño de partícula d(0.9): 0.1 mm		

Ficha 3. Control de calidad de los insumos empleados en la formulación de chocolate amargo.

Insumo: Manteca de cacao		Origen: Granel
Fecha de muestreo: 12 de Agosto 2014		Precio: \$ 160 / kg
Lote adquirido: 3 kg	Obs: Se encuentra quebrada y permanece en lugar seco y sin luz.	
Pruebas realizadas		
Temperatura de Fusión (°C): 36		
Uso de Fisher-Johnes		
Acidez titulable (% ác. Oleico): 1.27		
Índice de saponificación (mg KOH/g): 185.34		
Sensorial: Excelente		
Norma de referencia: NMX-343-SSA1/SCFI-2007		

Las especificaciones fisicoquímicas de la manteca de cacao están dentro de los parámetros establecidos por la normatividad, correspondiente para el empleo de manteca de cacao Tipo 1 correspondiente a manteca de cacao obtenida por prensado del licor obtenido del grano. El lote de manteca de cacao es considerado apto para su uso en las formulaciones de chocolate amargo.

En la evaluación sensorial los instrumentos de medición son los sentidos humanos. Considerando que las señales visuales son importantes en el control de calidad de las materias primas o del proceso; las impresiones visuales influyen definitivamente en la actitud del consumidor hacia el producto. En materia, es muy difícil que un consumidor acepte con agrado un chocolate que presenta Fat Bloom.

Dentro del análisis sensorial, es muy importante diferenciar entre el olor y el aroma; el primero es la percepción de sustancias volátiles por medio de la nariz, en cambio, el aroma es la detección después de haberse puesto el alimento en la boca, es decir que el aire en el caso del aroma, no es el medio de transmisión de la sustancia. Los sabores se perciben cuando se ponen en contacto los alimentos con la superficie de la lengua. La unión del gusto y del olfato se denomina << *analizador químico* >> conocido como *flavour*.

El sentido del oído, es importante en materia de la percepción de las cualidades del producto; en el caso del análisis sensorial del chocolate, el atributo más codiciado en la evaluación es el sonido << *snap* >> que está muy relacionado con la fragilidad del producto.

En la evaluación de la manteca de cacao las cualidades consideradas fueron color, textura, sabor y olor; a continuación se enlistan las especificaciones sensoriales del insumo a cumplir para poder ser empleado en la formulación de chocolate amargo:

Descripción	
Color	Amarillo claro, con código 120 en la escala de Pantone
Textura	Grasa, tersa, suave y lisa.
Sabor	Cera de abeja suave-casi insípida.
Olor	Aroma intenso a cacao, tostado penetrante.

La manteca de cacao presenta complejidad en la evaluación sensorial, sin embargo va muy relacionada a la descripción general de un chocolate, a sabiendas de un entrenamiento sensorial, la rueda de sabores (Figura 43) es una guía completa en el conocimiento del amplio campo que la ciencia sensorial implica.

La descripción de aromas y olores es tan amplia como la imaginación del evaluador perciba y enfoque en el desarrollo de la evaluación; se debe considerar que las variedades de Theobroma cacao y las operaciones industriales de preparación del grano para la obtención del licor como el fermentado y tostado son cruciales para la generación de estos atributos tan fascinantes, por lo que cada producto es auténtico desde su formulación y materia prima empleada para su elaboración.

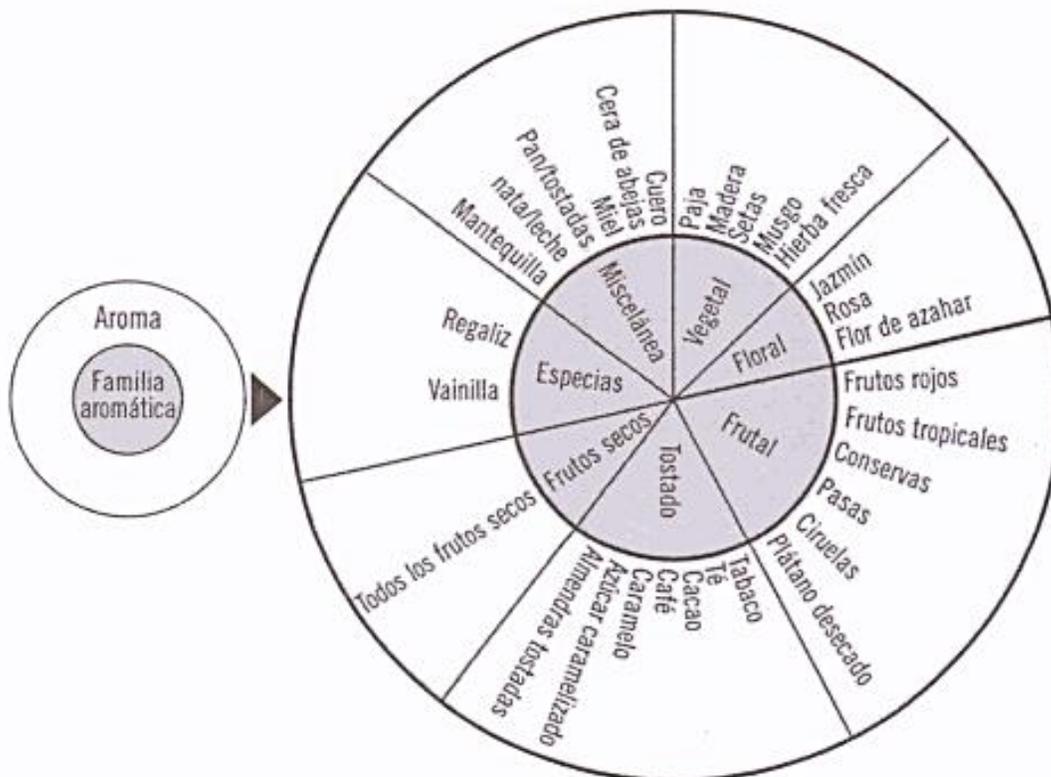


Figura 43.- Descripción esquemática para la descripción de olor del chocolate y sus derivados. FUENTE: Doutré- Roussell, 2007.

Ficha 4. Control de calidad del grano Theobroma cacao empleado para la obtención de licor de cacao.

	GRANO y No. de identificación: CACAO	Origen: OAXACA, OAXACA.
	Fecha de muestreo: 2 Febrero 2014	Precio: \$160 / kg
	Masa muestra: 2 kg	Observaciones: Lugar limpio, no permiten tocar la materia prima.

Sensorial y temperatura

Temperatura (°C): 18.4; 18.9; 18.8; 18.6; 18.4	Máx. diferencia entre los 5 puntos: 0.5 °C
T. ambiente: 19.5 °C	Máx. diferencia con la T. ambiente: 1.1 °C
Olor típico: chocolate suave persistente	Olores extraños: yute

Impurezas y Sanidad:

Masa muestra: 2 k Peso de impurezas: 0 % impurezas: 0.0 %

No piedras No hojas y tallos No terrones No insectos o fragmentos No pelos 1 paja

No excretas de roedor No vidrios otros: Ninguno

Humedad y Densidad

Humedad : 2.8 % Método: Termobalanza	Peso hectolítrico:	50.7	kg/hL
	Masa de mil granos:	1050	g
	Índice de flotación:	77	%
	Tamaño del grano:	976 granos / kg	

Análisis selectivo: (Figura A2-A5)

Peso muestra: 2 kg Quebrados: 3.73 % Contrastantes: 0 %



Figura A 1.- Grano quebrado por manipulación.

Daños por:

Insectos: 0.37 % Quemados: 16.01 % Roedores: 0 % Chupados: 7.15 % Violáceos: 0 %



Figura A 3.-

Granos de cacao perforados por presencia de gorgojo durante estancia en almacén.



Figura A 4.-

Granos de cacao quemados durante proceso de tostado.



Figura A 5.-

Granos de cacao secos; falta de cuerpo del cotiledón.

Suma dañados:	23.53 %	Total de defectuosos: 27.26 % (quebrados + dañados)
Norma o referencia:	Calidad: Cacao fermentado clase de calidad inferior	
NMX-F-352-S-1980. CACAO EN GRANO FERMENTADO.		

El grano de cacao fue sometido a molienda obteniéndose licor de cacao destinado a medición de PSD para comparación con la cocoa estándar.

Ficha 5.- Análisis de lote de cacao fermentado destinado a proceso de tostado y molienda.

Especificaciones	Cacao sin tostar
Lote	2000 g
Apariencia externa	Redondeada-ovalada, firme, opaca, con cascarilla adherida.
Materia extraña	0.77%
Grano seco/aplanado	5.33%
Grano trozado	0.36%
Grano completo	93.44%
Grano destinado al proceso de tostado	
Cascarilla	16.84%
Grano limpio	83.15%
Rendimiento tras la molienda	
Masa de grano tostado	1553.91 g
Licor de cacao	1064.73 g
Rendimiento	68.52%

La molienda realizada en dos partes: molino de cuchillas y molino de piedra, no logró disminuir las dimensiones de las partículas hasta el valor necesario para la elaboración del chocolate en condiciones ideales. El análisis por MEB, se obtiene una distribución de tamaño de partícula (PSD) muy heterogéneo en la molienda. Las dimensiones obtenidas en el licor de cacao van de 10 μm a 200 μm , con bordes rugosos y afilados, característicos de la molienda mecánica del grano. Los resultados por difracción de rayos láser muestran que el 90% de las partículas en el licor de cacao presenta un tamaño de $374.8 \pm 20.98 \mu\text{m}$ y un área superficial específica de $0.405 \pm 7.408 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{g}$.

El licor solo fue obtenido para comparación de PSD entre partícula por molturación y partícula estándar en la cocoa empleada.

Ficha 6.- Emulsificantes.

Emulsificante: Fosfatidos de Amonio		Origen: Palsgaard ®
Código: AMP 4448		Dosis: 0.4-1.0%
Propiedades funcionales:		
Diseñado para la reducción de la viscosidad plástica y el valor mínimo para iniciar el flujo; influencia mayor que la presentada al utilizar lecitina de soya estándar.		
No incrementa el valor mínimo en concentraciones mayores a 0.5% lo que beneficia a la reducción de materia grasa empleada en las formulaciones de chocolate.		
Excelente sinergia con PGPR y lecitina de soya.		

Emulsificante: Poliglicerol Poliricinolato		Origen: Palsgaard ®
Código: AMP 4150		Dosis: 0.1-0.5%
Propiedades funcionales:		
Diseñado para la reducción de la viscosidad plástica y el valor mínimo para iniciar el flujo. Diseñado para trabajar en sinergia con lecitina de soya. Típico para adelgazamientos de coberturas de chocolate.		

Emulsificante: Lecitina de soya		Origen: Cosmopolita ®
Código: Uso alimentario	Dosis: BPM, recomendado menor a 0.5%	
Propiedades funcionales:		
Diseñado para la reducción de la viscosidad plástica y el valor mínimo para iniciar el flujo; influencia mayor que la presentada al utilizar lecitina de soya estándar.		
Incrementa el valor mínimo en concentraciones mayores a 0.5%		

Anexo II. Control de calidad de piezas de chocolate para consumo

Las piezas elaboradas de chocolate amargo deben presentar cualidades específicas para la aceptación del lote final. A continuación se enlistan los criterios de calidad a evaluar una vez desmoldadas las piezas de chocolate.

Criterios a evaluar en las piezas individuales de chocolate amargo.

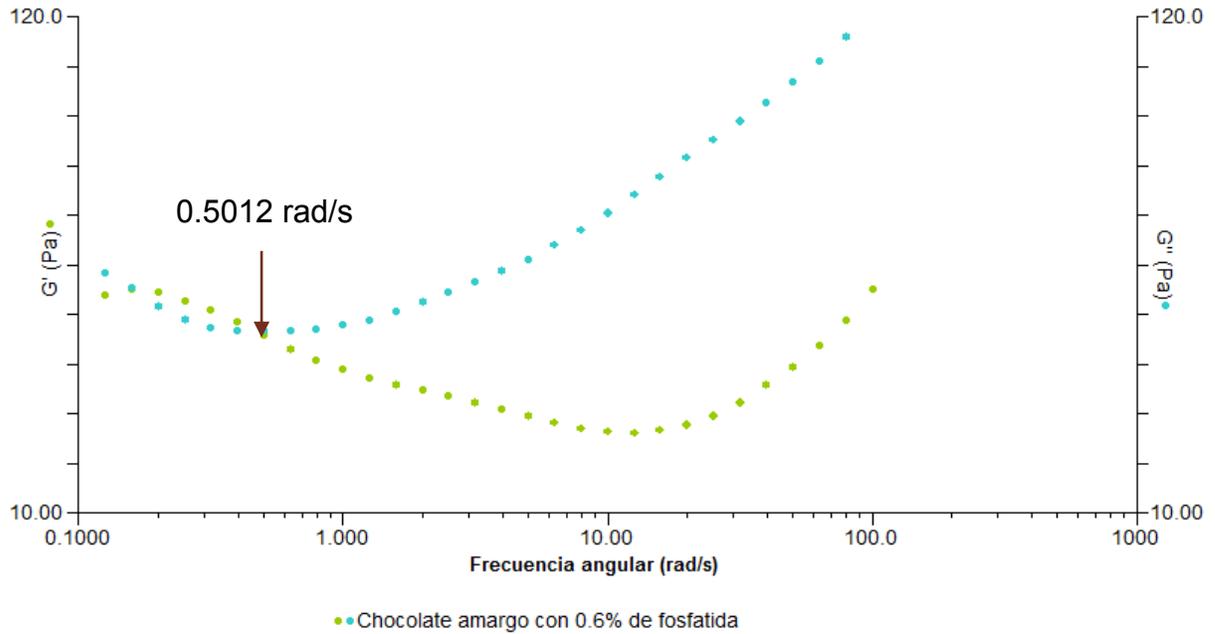


- ✓ Las piezas elaboradas presentan uniformidad en color y brillo conservándose hasta como periodo mínimo una semana para considerarse un buen temperado en el producto final.
- ✓ Presenta opacidad en la superficie pasadas dos semanas de la elaboración.
- ✓ Presentan un eco sonoro al ser mordido.
- ✓ Las piezas resisten solo 2.6 segundos al tacto antes de fundirse.

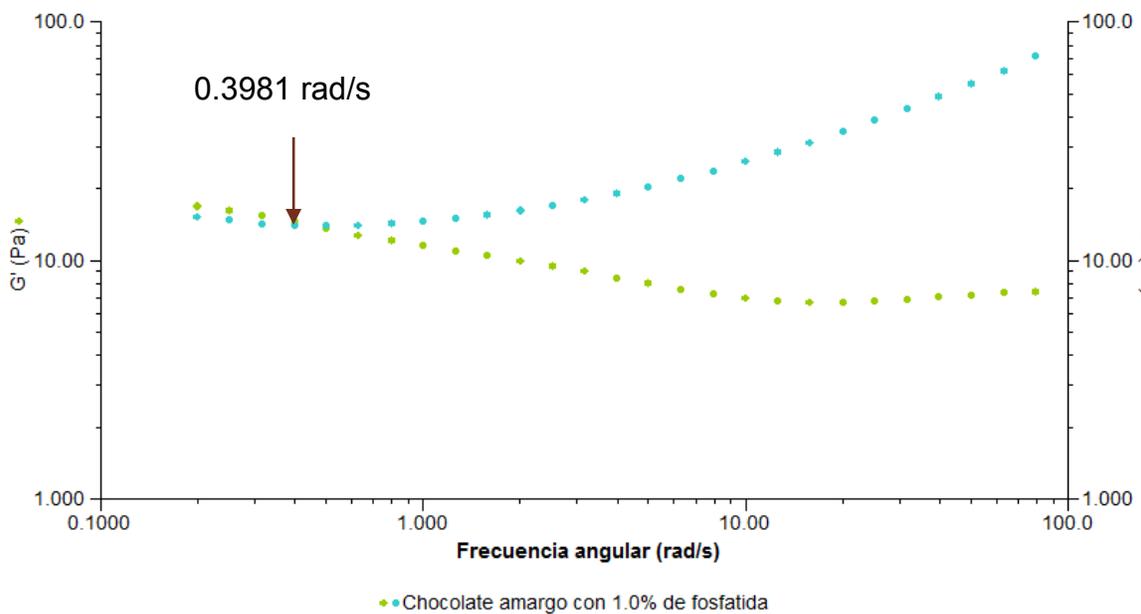
Se recomienda análisis sensorial donde se evalúen características intrínsecas al producto como aroma en su amplia descripción, sabor, gusto amargo/dulce, arenosidad, cohesividad, residuo graso y color (por mencionar algunas) en comparación con un chocolate amargo comercial elaborado de modo artesanal.

Estimación del tiempo característico

Graficas de G' , G'' contra frecuencia angular para la obtención del tiempo característico de las muestras de chocolate amargo elaboradas con fosfatida.



Gráfica de la intersección de G' y G'' para la obtención del tiempo característico de la muestra de chocolate amargo con fosfatida al 0.6% en la formulación. Análisis a 40.0 °C.



Gráfica de la intersección de G' y G'' para la obtención del tiempo característico de la muestra de chocolate amargo con fosfatida al 1.0% en la formulación. Análisis a 40.0 °C.

Chocolate

Un caleidoscopio histórico más allá de la industria de la transformación

Este último apartado, es una breve recopilación de la majestuosa transformación que ha vivido el cacao a lo largo de la historia, dejamos al lector una recopilación de los secretos más profundos que ha tenido *Theobroma cacao* hasta nuestros días, en donde el chocolate más allá de ceremonias y rituales, es ahora más que un gusto por una golosina, es en sí una probadita de cielo que los Dioses Aztecas nunca imaginaron probar. En el pueblo azteca, el cacao se valoraba tanto como una la ofrenda de un corazón tibio pues ambos contenían dos líquidos preciosos: la sangre y el chocolate; hoy para los gustosos esa relación espiritual aun reluce ya que el chocolate es sinónimo de victoria en un romance.

El método azteca básico para preparar chocolate de alta calidad o mejor conocido como Tlaquetzalli consistía *en moler los granos de cacao hasta hacerlos polvo y añadir agua poco a poco batiendo hasta que apareciera espuma* (Coe, 2013).



Detalle del Códice Nuttall, libro Mixteco; Oaxaca, México. El gran Rey 8-Ciervo recibe una vasija de espumoso chocolate de su desposada, la princesa 13-Serpiente, en el año 1051.



Glifo maya para el cacao en el período Clásico.
(Coe, 2013)



Glifo maya para el cacao en el período Posclásico.
(Coe, 2013)

¡Amigos míos poneos de pie!
desamparados están los príncipes,
yo soy Nezahualcóyotl,
soy el cantor,
soy papagayo de gran cabeza.
toma ya tus flores y tu abanico.
¡Con ellos parte a bailar!

Tú eres mi hijo,
tú eres Yoyontzin.
toma tu cacao,
la flor del cacao,
¡Que sea ya bebida!
¡Hágase el baile,
comience el dialogar de los cantos!
no es aquí nuestra casa,
no viviremos aquí,
tú de igual modo tendrás que marcharte.

Nezahualcóyotl

Trece poetas del mundo Azteca

León Portilla Miguel, 1992.

El chocolate en la medicina

Después de la conquista la forma de preparar el chocolate se vio transformada por la cultura y costumbres europeas, es así que en 1644 Antonio Colmenero de Ledesma, médico de origen andaluz, escribió uno de los primeros tratados del chocolate en español (*Chocolata Inda ; opusculum de qualitate et natura Chocolatae*). La publicación del libro fue una de las primeras ocasiones en las que se describe la receta como una bebida caliente, es decir una bebida con tendencia a producir melancolía, es por ello que Ledesma deja en la historia una receta médica de invaluable valor en la medicina antigua:

100 almendras de cacao

Dos chiles (pueden ser sustituidos por pimienta negra)

Un puñado de anís

Rosa de Alejandría pulverizada

1 Vainilla

2 onzas de canela

12 almendras y avellanas

½ libra de azúcar

Achiote al gusto

Después de analizar el caleidoscopio químico que significa el chocolate gracias a la materia prima usada, sabemos que más que melancolía... ¡es la teobromina la que nos reanima!

Las tazas de chocolate,
si, o de té,
son medicinas que no son para mí.
Prefiero el veneno que una taza mirar
de esa cosa amarga y pulposa
a la que llaman café.

(Hunt, Leigh. Londres 1825. *Bacchus in Tuscany:
A Dithyrambic Poem from the Italian of Francesco Redi.*)

¡Oh, divino chocolate!
que arrodillado te muelen,
manos de mujer te baten
y ojos al cielo te beben!
(*Marco Antonio Orellana*)

El chocolate excelente para que cause placer,
cuatro cosas debe ser:
espeso, dulce, caliente
y de manos de mujer.
(*Anónimo*)

La barra de chocolate
aún, no me la he comido,
debe estar vuelta desastre
porque seguro, se ha derretido.
(*Anónimo*)

Con ademán decidido
te tomé del escaparate,
pues me sentía atraído
por tu olor a chocolate
(*Nélida Anderson*)

La sabiduría popular bañada en chocolate...

“Toma Chocolate y paga lo que debes”

“¡Ay! Estoy como agua para chocolate”

“Chocolate que no tiñe, claro está”

“No le pido pan al hambre, ni chocolate a la muerte”

“Ni amor reanudado ni chocolate recalentado”

“Si como lo mueve lo bate...”

“Chocolate y fosfatida... dulce mezcla que me tiene confundida”

(Tayde Roxana)