

**INFLUENCIA DEL MALTITOL SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO  
DEL CHOCOLATE DE COBERTURA**

**DEISY CONSTANZA BARRERA ROJAS  
LINA MARÍA TORRES VARGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**INFLUENCIA DEL MALTITOL SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO  
DEL CHOCOLATE DE COBERTURA**

**DEISY CONSTANZA BARRERA ROJAS**

**LINA MARÍA TORRES VARGAS**

**Trabajo de grado para optar al título de ingeniera química**

**DIRECTOR**

**Profesor: Arlex Chaves Guerrero**

**Ph.D. Ingeniería Química, Ingeniero Químico**

**CO-DIRECTORAS**

**Luz María Arango Jaraba**

**M.Sc. Química, Química**

**Claudia Ferro Urango**

**Ingeniera de Alimentos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## AGRADECIMIENTOS

Al Doctor **ARLEX CHAVES GUERRERO**, director del proyecto, por su orientación, enseñanza y asesoría en la culminación de esta etapa profesional. Por su acompañamiento y dedicación constante.

Al grupo de investigación y desarrollo del cacao y la chocolatería (**CHOCADIG**) de la Escuela Latinoamericana de Chocolate SENA en la sede de Piedecuesta Santander, quienes nos dieron la oportunidad de realizar este proyecto.

Alas instructoras del SENA, **Luz María Arango** y **Claudia Ferro**, por brindándonos su apoyo, conocimiento y experiencia.

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, por la formación profesional y personal brindada.

A nuestros profesores, quienes durante el transcurso de nuestra carrera se esforzaron por brindarnos una educación íntegra y responsable, gracias por su paciencia y enseñanza.

## **DEDICATORIA**

### **A nuestro padre creador.**

Quien me orientó hasta este punto del camino.  
Permitiéndome aprender del pasado y añorar por un futuro mejor.  
Indicándome el momento ideal para caer, reflexionar, aprender y seguir como  
valientes.

### **A mí querida madre.**

María Ernestina, por ser la amiga y compañera que me ha ayudado a crecer  
A ella, la luz de mi camino, le dedico este triunfo  
Como un pequeño presente de agradecimiento por años de perseverancia y lucha.

### **A mí querido hermano.**

Julian, por soportar momentos difíciles y sacrificar sueños y metas  
A causa de su obstinada hermana, poniéndose en el papel de padre.  
Quiero que sienta este logro parte de usted porque  
Sin su apoyo no hubiera sido posible.

### **A mis primos, tía y tío**

Quienes con sus palabras de fortaleza y apoyo incondicional  
Ayudaron a ser más soportable el camino hacia esta meta.  
Espero que se sientan orgullosos.

### **A mis apreciados amigos**

Por la compañía y apoyo incondicional desde el inicio de la carrera.  
Por ayudarme a levantar cuando caía, por tener la fortuna de conocerlos.

**Deisy Constanza Barrera Rojas**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por la vida, la salud y las bendiciones recibidas.

A mi madre Socorro Vargas y mi padre Segundo Torres, por el apoyo y amor que me han dado. Ustedes son el motor de mi vida.

A mis hermanos y sobrinos, por su cariño, respaldo y creer en mí.

A mi tía Flor Ángela y primas, por el apoyo y consejos brindados.

A mis amigos de la universidad, María, Jessica, Deisy, Stephany, Karina, Victoria, Luis Fernando, Andrés y Henry, por su incondicionalidad y los momentos compartidos.

**Lina María Torres Vargas**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. MARCO TEÓRICO .....	18
1.1. COMPOSICIÓN Y MORFOLOGÍA DEL CHOCOLATE .....	18
1.2. AGENTES DE VOLUMEN .....	18
1.3. PROCESAMIENTO DEL CHOCOLATE .....	19
1.4. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL CHOCOLATE .....	20
1.5. PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL CHOCOLATE.....	21
2. METODOLOGÍA .....	24
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.2. PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO .....	25
2.2.1. Configuración del equipo.....	26
2.2.2. Curvas de flujo .....	26
2.2.3. Ajuste del modelo.....	27
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	28
3.1. GRADO DE TIXOTROPÍA EN CHOCOLATE AMARGO Y CHOCOLATE CON LECHE .....	28

3.2.	RESULTADOS REOLÓGICOS PARA MUESTRAS DE CHOCOLATE AMARGO.....	31
3.3.	RESULTADOS REOLÓGICOS PARA MUESTRAS DE CHOCOLATE CON LECHE.....	33
3.4.	SIMILITUDES AZÚCAR / MALTITOL .....	35
4.	CONCLUSIONES .....	37
5.	RECOMENDACIONES .....	38
	BIBLIOGRAFÍA.....	39
	ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades de los agentes de volumen .....	19
Tabla 2. Modelos de Newton generalizados .....	22
Tabla 3. Composiciones chocolates con maltitol .....	24
Tabla 4. Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate amargo con maltitol.....	32
Tabla 5. Viscosidad plástica y Esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate amargo con azúcar .....	32
Tabla 6. Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate con leche en presencia de maltitol .....	33
Tabla 7. Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate con leche en presencia de azúcar.....	34
Tabla 8. Razón de cambio de viscosidad y esfuerzo de deformación .....	36

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Etapas del proceso de chocolate.....	19
Figura 2. Loop de histéresis típica de las curvas de flujo.....	21
Figura 3. Representación de curvas de flujo para diferentes flujos.....	22
Figura 4. Etapas del protocolo de experimentación.....	25
Figura 5. Ciclos de histéresis del chocolate amargo 57,0% LC con maltitol.....	28
Figura 6. Grado de tixotropía del chocolate amargo.....	29
Figura 7. Grado de tixotropía del chocolate con leche.....	30
Figura 8. Viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate amargo del 70,0% LC con maltitol.....	31
Figura 9. Esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate amargo en presencia de azúcar o maltitol al 70,0% p/p LC.....	36

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Verificación de repetitividad para cada una de las formulaciones de chocolate con maltitol y azúcar.....	42
Anexo B. Ciclo de histéresis .....	43
Anexo C. Curvas de esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación. ....	48
Anexo D. Viscosidad y esfuerzo a bajas y altas razones de deformación .....	50

## RESUMEN

**Título:** INFLUENCIA DEL MALTITOL SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL CHOCOLATE DE COBERTURA \*

**Autoras:** Deisy Constanza Barrera Rojas e Lina María Torres Vargas\*\*

**Palabras clave:** Maltitol, sacarosa, sustituto, reología, tixotropía

### Descripción

Hoy en día el consumo de alimentos saludables adquiere una importancia significativa, llevando a la población a elegir productos en los que se haya disminuido o reemplazado el azúcar, dado los efectos negativos que esta tiene sobre la obesidad, diabetes, caries dental, entre otras. Este proyecto por lo tanto busca evaluar la influencia que tienen el uso de maltitol como sustituto de la sacarosa y los parámetros de influencia sobre las propiedades reológicas como viscosidad plástica ( $\eta_p$ ) y esfuerzo mínimo de fluencia ( $\tau_o$ ). Se utilizaron modelos como el de Casson y Bingham para explicar el comportamiento reológico. Para esto se realizaron pruebas en el reómetro MCR-302 Anton Paar a ocho muestras de chocolate entre amargo y chocolate con leche. Las muestras estudiadas se caracterizaron por tener un comportamiento tixotrópico. Una vez fue eliminada la tixotropía, estas fueron ajustados a los modelos generalizados y posteriormente se calcularon los valores de  $\tau_o$  y  $\eta_p$  de cada una de las muestras. Los resultados mostraron que en las muestras de chocolates amargos el mayor grado de tixotropía lo presentó los chocolates con azúcar, mientras que en los chocolates con leche fueron las muestras en presencia de maltitol, el modelo que presentó el mejor ajuste para las muestras de chocolate estudiadas fue el de Bingham. Los chocolates con maltitol presentan una menor  $\eta_p$  y mayor  $\tau_o$  lo que permitiría una mejor manipulación del mismo, tanto para los chocolates amargos como para los chocolates con leche a 45°C. El uso de maltitol generó un efecto representativo en las propiedades reológicas del chocolate de cobertura.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Director: Dr. Arlex Chaves Guerrero.

## ABSTRACT

**Title:** MALTITOL INFLUENCE ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF CHOCOLATE COVERAGE \*

**Autors:** Deisy Constanza Barrera Rojas e Lina María Torres Vargas\*\*

**Key Words:** Maltitol, saccharose, substitute, rheology, thixotropy

### Description

Today the consumption of healthy foods acquires significant importance, leading the population to choose products that have been reduced or replaced sugar, given the negative effects this has on obesity, diabetes, tooth decay, among others. This project aims at evaluating the influence of maltitol use as a substitute for sucrose and parameters influence on the rheological properties of plastic viscosity ( $\eta_p$ ) and yield stress ( $\tau_0$ ). Models as Casson and Bingham were used to explain the rheological behavior. For this testing were made in the rheometer MCR-302 Anton Paar to eight samples of dark chocolate and milk chocolate. The studied samples were characterized by having a thixotropic behavior. Once was eliminated thixotropy, these were adjusted to generalized models and subsequently values were calculated of  $\tau_0$  and  $\eta_p$  of each of the samples. The results showed that in the samples of dark chocolates the higher degree of thixotropy it presented the chocolates with sugar, whereas in the chocolates with milk were the samples in presence of maltitol, the model that presented the best adjustment for the studied samples of chocolate was of Bingham. Chocolates with maltitol present a  $\eta_p$  less and a  $\tau_0$  higher allowing better handling itself, both for bitter chocolates and for milk chocolate to 45 ° C. The use of maltitol generated a representative effect on the rheological properties of chocolate coverage.

---

\*Degree Work

\*\* Chemical Engineering School, Physic-Chemistry Faculty, Industrial University of Santander, Director: Dr. Arlex Chaves Guerrero

## INTRODUCCIÓN

Un chocolate consiste en una fase dispersa compuesta por partículas sólidas de azúcar y cacao cubierta por una matriz de aceites grasos provenientes de la manteca de cacao (Afoakwa, *et al.*, 2008a). El chocolate contiene los tres componentes esenciales de los alimentos, es decir, proteínas, carbohidratos y grasas (aunque no en proporciones ideales), junto con algunas vitaminas y algunos minerales (Beckett 2009). Comer una cantidad limitada (hasta una barra estándar por día) de chocolate ha demostrado no tener un efecto significativo en las migrañas, acné y obesidad como nos han hecho creer (Beckett 2008).

Recientemente ha sido renovado el interés científico sobre los beneficios del consumir cacao y chocolate, por su posible incidencia en reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Los nuevos estudios relacionan compuestos vegetales fisiológicamente activos conocidos como polifenoles y más específicamente de flavanoles. Los flavanoles son conocidos por tener propiedades antioxidantes y otros beneficios potenciales para la salud. Los flavanoles del cacao han demostrado ser capaces de limitar la progresión de la enfermedad cardiovascular ejerciendo como antiplaquetarios y antiinflamatorios (Beckett 2008).

La gran mayoría de los chocolates tradicionales contienen cerca de un 50% de azúcar y por razones tecnológicas y/o de salud se han desarrollado otras fórmulas en las que se incorporan otros agentes de volumen alternativos que no son azúcares, llamados polioles como maltitol, sorbitol, manitol, xilitol, entre otros. Sin embargo, estos agentes deben generar chocolates de igual calidad desde el punto de vista sensorial y de calidad del chocolate producido. Existe una serie de consideraciones que deben estar presentes para la producción de un chocolate de buena calidad. Cada paso del procesamiento del chocolate y su composición afectan el comportamiento reológico y la morfología final del chocolate. Dependiendo del proceso de manufactura durante su producción (refinado,

atemperado y moldeado) se ejerce un esfuerzo o deformación determinado, por lo que se necesita una viscosidad adecuada que facilite el procesamiento del mismo y se impida la posible ruptura de la estructura del chocolate. Es bien sabido que el chocolate tiene un comportamiento reológico no Newtoniano, por lo que su viscosidad no puede describirse por un único valor, ya que dependerá de la velocidad de deformación que se le aplica e incluso es dependiente del tiempo. Igualmente el chocolate se caracteriza por presentar un esfuerzo de fluencia, un punto de fluidez, los cuales son importantes a la hora de su procesamiento y durante su consumo.

Lo anterior indica la importancia de evaluar las diferentes composiciones del chocolate sobre el comportamiento reológico (Beckett 2008). Estudios como los de Taylor (2009) han intentado predecir y evaluar por medio de modelos matemáticos como el de Carreau y Casson el cambio en la viscosidad bajo procesos de deformación. Por tal razón, este proyecto tiene como objetivo determinar si existe algún efecto del maltitol sobre el comportamiento reológico de los chocolates de cobertura cuando este es usado como sustituto del azúcar en las formulaciones de chocolate. Este trabajo hace parte de un proyecto realizado por el grupo de investigación y desarrollo del cacao y la chocolatería (CHOCADIG) de la Escuela Latinoamericana de Chocolate SENA en la sede de Piedecuesta Santander que busca sustituir el azúcar en las formulaciones del chocolate.

Se evaluó el efecto de los componentes del chocolate específicamente, concentración de cacao, porcentaje de grasa y agentes de volumen en las propiedades reológicas. Se basó en el análisis de tres modelos reológicos empleados para mezclas con partículas en suspensión como son el modelo de Bingham, Casson y Casson modificado, encontrando una buena aproximación de estos modelos en un rango limitado de velocidad de corte aplicada a la muestra.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. COMPOSICIÓN Y MORFOLOGÍA DEL CHOCOLATE

La manteca de cacao está compuesta principalmente por tres tipos de ácidos grasos: ácido esteárico que tiene poco efecto sobre los niveles de colesterol, ácido oleico que disminuye el colesterol en la sangre y ácido palmítico que tiene un efecto moderado en el aumento de colesterol (Beckett 2008).

Dependiendo del proceso de cristalización y la composición de los triglicéridos durante la producción del chocolate es posible obtener seis polimorfismos ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta 2'$ ,  $\beta 1'$ ,  $\beta 2$  y  $\beta 1$ ), de los cuales la fase gama ( $\gamma$ ) es la menos estable. La forma  $\beta 2$  es la más deseable y estable dando una apariencia brillante, resistencia a la ruptura, baja contracción y resistencia a la migración (Talbot 2009; Afoakwa, *et al.*, 2007).

### 1.2. AGENTES DE VOLUMEN

“Los polioles no son azúcares, son derivados de hidratos de carbono en los cuales el grupo carbonilo (aldehído o cetona) ha sido reducido a un grupo hidroxilo primario o secundario. Estas sustancias adquieren particular importancia nutricional pues, aunque son derivados de azúcares, no son metabolizados en el cuerpo como tales” (Reyo. *et al.*, 2010). De los polioles que existen en el mercado, el maltitol posee un dulzor relativo suficiente como para ser reemplazado en una proporción de partes iguales por el azúcar (relación 1:1), además de aportar el volumen requerido en las formulaciones.

El maltitol es un poliol disacárido, formado por una glucosa y un sorbitol, la función principal de los polioles es dar volumen y aportar dulzor, el alto consumo de maltitol puede producir un efecto laxante (Sánchez 2014; Beckett 2009).

El azúcar es la sacarosa cristalizada de sabor dulce, extraída de caña de azúcar o remolacha azucarera; la sacarosa es un disacárido compuesto de enlaces de una glucosa y una fructuosa, es menos higroscópica que la fructuosa (Sánchez 2014; Beckett 2009). En la Tabla 1 se muestran las propiedades físico-químicas del maltitol y azúcar.

**Tabla 1.** Propiedades de los agentes de volumen

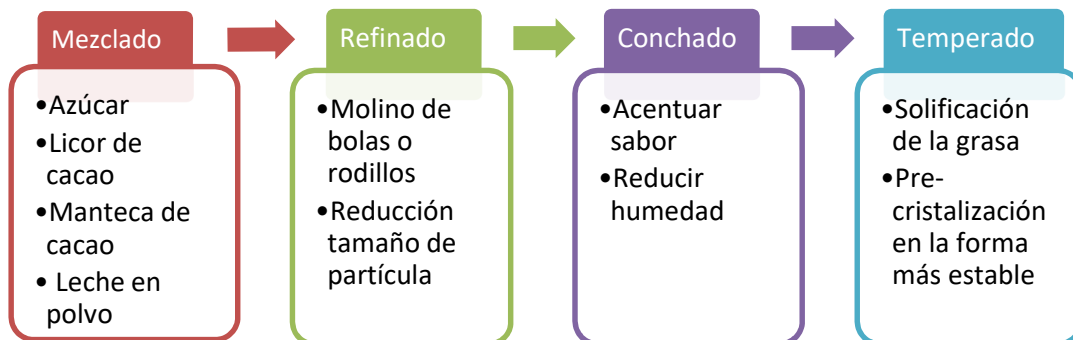
PROPIEDADES	MALTITOL	AZÚCAR
Valor calórico (kcal/g)	2,4	4,0
Poder edulcorante (%)	90	100
Saturación (g/100g s/n,20°C)	62,3	66,7
Punto de fusión (°C)	147,0	185-186
Solubilidad (g/100ml H <sub>2</sub> O, 25°C)	175,0	211,4

Fuente: Sánchez 2014; Beckett 2009 modificada por autores.

### 1.3. PROCESAMIENTO DEL CHOCOLATE

El proceso consta de varias etapas, cada una de estas es de gran importancia en la producción y determinará el acabado final del chocolate en relación con la contextura y viscosidad del mismo. Las principales etapas del proceso de formación del chocolate son mostradas en la Figura 1.

**Figura 1.** Etapas del proceso de chocolate



#### 1.4. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL CHOCOLATE

La reología estudia los principios físicos que regulan el movimiento y la deformación de la materia cuando es sometida a esfuerzos externos, es decir, la relación entre el esfuerzo y la deformación en materiales que son capaces de fluir; definiendo como flujo la deformación continua generada por la aplicación de una fuerza tangencial (Barnes, 2000).

La tixotropía consiste en el cambio de la viscosidad con respecto al tiempo a una razón de deformación constante; cuanto más se someta el fluido a esfuerzos de cizalla, más disminuye su viscosidad. Una forma de observar la tixotropía es realizando un aumento lineal de la velocidad de corte de un valor menor a un máximo y luego de forma inversa. Por medio de este se crea el Loop de histéresis (Figura 2), en donde el área bajo la curva cuantifica la tixotropía de la muestra (Barnes, 2000).

El área encerrada entre la curva del ciclo de histéresis puede definirse como un índice de tixotropía según Benchabene y Bekkour (2008), para determinarlo proponen evaluar el grado de tixotropía con un índice adimensional  $\alpha'$ , que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\alpha' = 100 * \left[ \frac{U-D}{U} \right] \quad (1)$$

Dónde:

$\alpha'$  es el grado de tixotropía (%).

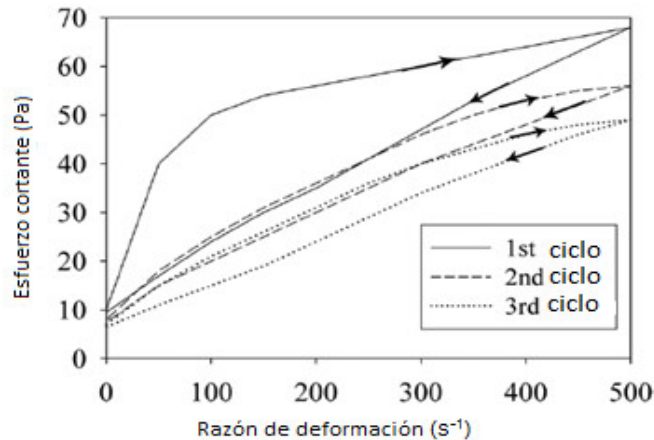
U es el área obtenida por debajo de la curva de arriba, en unidades de pascales.

D es el área obtenida por debajo de la curva de abajo, en unidades de pascales.

En el caso del chocolate, la posibilidad de que exista tixotropía depende principalmente del mezclado y el proceso de conchado; un mal mezclado presenta un mal cubrimiento de las partículas sólidas con la grasa, lo que genera más

tixotropía, se puede comprobar que un chocolate presenta buen mezclado cuando el área en la curva de histéresis es casi nula (Beckett, 2009).

**Figura 2.** Loop de histéresis típica de las curvas de flujo



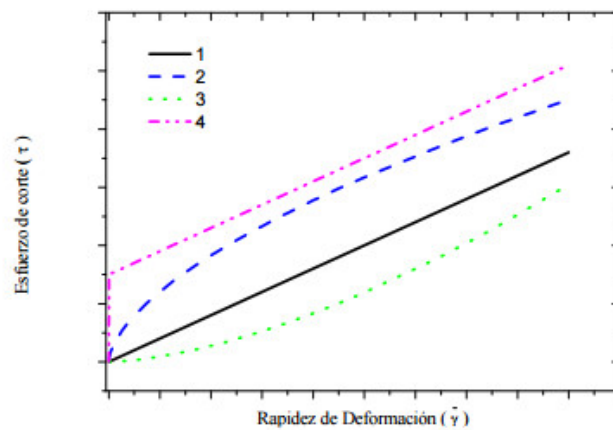
Fuente: T. Norton (2011), modificada por autores

### 1.5. PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL CHOCOLATE

Dado que a la hora de la elaboración de cualquier producto de chocolate la viscosidad como también el esfuerzo aplicado, la composición de los ingredientes y el modo en que el chocolate es fabricado influyen en gran manera en el valor de la viscosidad final del producto, afectando de esta manera la calidad final del producto. Como se mencionó, el chocolate es un fluido no Newtoniano que ha sido ajustado a modelos de Newton generalizados que no tienen en cuenta comportamiento viscoelástico (o muy débil comportamiento viscoelástico) ni dependencia del tiempo. En la literatura se ha reportado que el chocolate se ajusta a los modelos de Bingham, Carreau, Herschel-Bulkley, Casson (Ardakani, *et al.*, 2014) y Casson modificado (Glicerina, *et al.*, 2015). Sin embargo, el modelo más utilizado es el modelo de Casson ya que este da una buena aproximación del comportamiento reológico a velocidades de corte de 2-50 s<sup>-1</sup> que son los indicados en los métodos

de la Oficina de Cacao, Chocolate y Confección (IOCC2000; Gonçalves y Lannes, 2010; Afoakwa, *et al.*, 2008b), en la Figura 3 se muestran las curvas de flujo para algunos fluidos con comportamiento reológico que siguen los modelos de Casson y Bingham. En la Tabla 2 se muestran los modelos de Newton generalizados más usados.

**Figura 3.** Representación de curvas de flujo para diferentes flujos. 1) Fluido Newtoniano, 2) fluido no Newtoniano adelgazante (Casson), 3) fluido no Newtoniano dilatante, 4) fluido de Bingham.



Fuente: Méndez, Pérez, Paniagua. 2010.

**Tabla 2.** Modelos de Newton generalizados

Modelo	Ecuación
Bingham	$\tau = \tau_y + \eta_p * \dot{\gamma}$ (2)
Carreau	$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = (1 + (K' \dot{\gamma})^2)^{\frac{n'-1}{2}}$ (3)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_o + K \dot{\gamma}^n$ (4)
Casson	$\tau^{0,5} = K_{oc} + K_c * \dot{\gamma}^{0,5}$ (5)
Casson modificado	$\tau^{0,6} = K_{oc} + K_c * \dot{\gamma}^{0,6}$ (6)

Donde  $\tau_y, \eta_p$  son el esfuerzo mínimo y viscosidad plástica en la Ec. (2). En la Ec. (3)  $\eta_0$  y  $\eta_\infty$  representan la viscosidad de Carreau inicial y la viscosidad cuando tiende al

infinito, respectivamente;  $n'$  es un factor exponencial relacionado con el material de pseudoplasticidad y  $K'$  es un factor de reducción de la velocidad de cizallamiento. En la (Ec.4) el esfuerzo mínimo de corte de Casson ( $\tau_{0C}$ ), es evaluado como el cuadrado del valor del intercepto ( $K_{0C}^2$ ), y la viscosidad plástica de Casson ( $\eta_{ca}$ ), es el cuadrado de la pendiente ( $K_C^2$ ). En la Ec. (5) el esfuerzo mínimo de corte de Casson modificado ( $\tau_{0C}$ ), es evaluado como el intercepto elevado a la 5/3 ( $K_{0C}^{5/3}$ ), y la viscosidad plástica de Casson modificado ( $\eta_{ca}$ ), es la pendiente elevada a la 5/3 ( $K_C^{5/3}$ ) (Rao, 2007).

Cabe recalcar que la reología del chocolate no solo se ve afectada por la temperatura o la composición del mismo, sino también por otros factores como lo son el tamaño de partícula del chocolate, la presencia de emulsionantes y el porcentaje de humedad presente en el chocolate; cada uno de estos factores tienen gran influencia en las propiedades reológicas especialmente en la viscosidad del mismo (Beckett, 2009).

Cuando el tamaño de partícula es pequeño existe una mayor área superficial, por lo que más grasa será empleada para cubrir las superficies y quedará menor grasa libre, encargada de permitir la fluencia entre las partículas, disminuyendo así la capacidad de fluencia del sistema y haciendo la muestra más viscosa (Beckett, 2009).

Igualmente con respecto a la humedad, aproximadamente por cada 0,3% de humedad adicional que quede dentro del chocolate al final del refinado, se debe adicionar un extra de 1,0% de grasa, dado que la grasa es el componente más caro, es importante que el agua libre se retire lo más posible. Si el contenido de humedad es de 1,0% o superior, la viscosidad empieza a aumentar tan pronto como la temperatura alcanza los 45°C (Beckett, 2008). Por otro lado la humedad adicional en el chocolate haría aumentar la interacción entre las partículas de azúcar y de esta manera aumenta la viscosidad (Afoakwa, *et al.*, 2007).

## 2. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una serie de pruebas experimentales con el objetivo de evaluar los valores de viscosidad y el esfuerzo de corte de cada una de las muestras a una determinada temperatura (45°C), la cual fue mantenida constante durante la prueba. Las muestras proporcionadas por el grupo CHOCADIG fueron elaboradas a escala piloto en batches de 10 kg, donde el chocolate no fue sometido a un proceso de conchado, debido a que la conchadora opera mínimo a 100 kg. Cada una de las muestras cuenta con una composición diferente de maltitol, lo que permitió estudiar su efecto sobre la viscosidad, igualmente se realizaron las pruebas a muestras con la misma formulación pero en presencia de azúcar para así lograr una comparación de las mismas; el tamaño de partícula<sup>1</sup> de cada una de las muestras de chocolate fue en promedio 25 µm. Las composiciones de todas estas formulaciones se muestran en la Tabla 3.

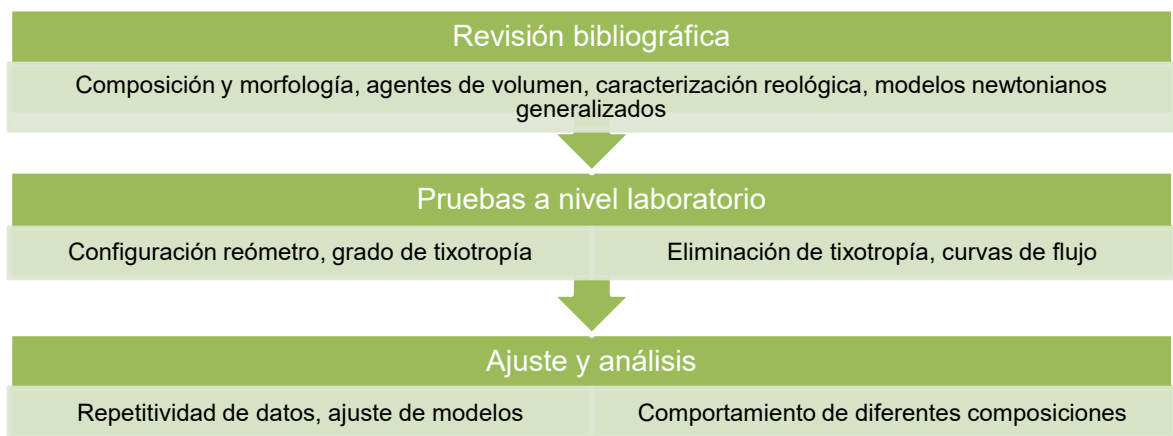
**Tabla 3.** Composiciones chocolates con maltitol

	CHOCOLATE AMARGO		CHOCOLATE CON LECHE	
	70,0% LC	57,0% LC	36,0% LC	26,4% LC
<b>INGREDIENTES</b>	<b>FORMULA (%)</b>			
Maltitol	24,3	37,3	31,4	40,0
Manteca de cacao	5,0	5,0	15,0	15,0
Licor de cacao conchado	70,0	57,0	36,0	26,39
Leche entera en polvo	-	-	12,0	13,0
Leche descremada en polvo	-	-	5,0	5,0
Sal	0,06	0,06	-	-
Polirrinoleato de poliglicerol (PGPR)	0,2	0,2	0,2	0,2
Lecitina	0,4	0,4	0,4	0,4
Vainillina	0,01	0,01	0,01	0,01
	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Grasa total (%)</b>	<b>42,1</b>	<b>35,2</b>	<b>37,3</b>	<b>32,4</b>

<sup>1</sup> El tamaño de partícula fue medido por medio de un micrómetro digital, durante el procesamiento del chocolate en la Escuela Latinoamérica de Chocolatería

Finalmente, se realizó un ajuste de datos a los modelos estudiados. El protocolo usado para llevar a cabo la experimentación consta de 3 etapas mostradas en la Figura 4 y que se describen a continuación. Todos los ensayos reológicos se realizaron a 45°C que son las condiciones a las que operan y se verificó la repetibilidad de los ensayos donde todas las muestras de chocolate bajo las mismas condiciones de operación, presentaron una desviación estándar aceptable dentro del intervalo de confianza de 95% para el esfuerzo de corte como se muestra en el anexo A.

**Figura 4.** Etapas del protocolo de experimentación



## 2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una amplia revisión de bibliografía, reconociendo los agentes de volumen utilizados, el proceso de manufactura, la caracterización reológica y las variables que tienen influencia sobre las propiedades reológicas, así mismo los diferentes modelos Newtonianos generalizados utilizados en la industria de chocolate.

## 2.2. PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO

La secuencia usada para las pruebas reológicas en la evaluación de presencia de tixotropía su posterior eliminación y obtención de las curvas de flujo son descritas a

continuación, de acuerdo al diseño de experimentos descritos por Sokmen y Gunes (2006) y Glicerina, *et al.*, (2016), a los que se les realizó una modificación en el número de ciclos de histéresis de acuerdo al requerimiento de cada muestra.

**2.2.1. Configuración del equipo:** El equipo utilizado para la toma de datos fue un reómetro MCR-302 Anton Paar. Dado que el chocolate presenta un grado de tixotropía es necesaria la eliminación de esta, para lo cual se hicieron ciclos de histéresis a cada una de las muestras mediante la aplicación de rampas de velocidad de deformación de la siguiente forma.

1. El primer paso para la estabilización de la muestra, tiene una duración de 10 min, a una velocidad de deformación constante de  $5 \text{ s}^{-1}$ .
2. El segundo paso fue construir curvas de esfuerzo versus razón de deformación. Para esto se usó una rampa lineal de razón de deformación con incrementos de  $2,823 \text{ s}^{-1}$  cada 10 s, iniciando desde  $2 \text{ s}^{-1}$  hasta  $50 \text{ s}^{-1}$ .
3. El tercer paso se realiza a una velocidad de deformación de  $50 \text{ s}^{-1}$ , realizando registro de 6 puntos.
4. El mismo procedimiento del punto 2 fue realizado pero en la dirección contraria, es decir de  $50 \text{ s}^{-1}$  a  $2 \text{ s}^{-1}$ , a una velocidad de deformación de  $2 \text{ s}^{-1}$  a  $50 \text{ s}^{-1}$ , realizando registro de 18 puntos.
5. Este procedimiento de histéresis en los esfuerzos se repitió hasta que el área de la curva de histéresis se reduce, siendo casi nula.

**2.2.2. Curvas de flujo:** Cada muestra de chocolate presenta un grado de tixotropía diferente, por lo que fue necesario realizar varios ciclos de histéresis repetitivos con el fin de eliminar tal tixotropía. Una vez se logra un bajo grado de tixotropía, se procede a tomar los datos de ese último ciclo para el posterior análisis.

- El grado de tixotropía se calculó por medio de la Ec. (1), con los datos obtenidos en el ciclo de histéresis en el reómetro en un rango de velocidad de deformación de  $2 \text{ s}^{-1}$  a  $50 \text{ s}^{-1}$ , el área bajo las curvas de subida y bajada se calculó por medio de los métodos de integración de Simpson 3/8 y trapecios (Chapra 2007)
- Verificación de repetitividad: Se realizó el tratamiento estadístico de los datos obtenidos para cada uno de los esfuerzos encontrados en cada corrida bajo las mismas condiciones de operación. Se verificó que los datos tuvieran una desviación estándar aceptable con un 95% de confianza. Para este se aplicó un ANOVA y para el intervalo de confianza se utilizó la siguiente ecuación (Montgomery)

$$\frac{s_1^2}{s_2^2} f_{0.95,17} \leq \frac{\theta_1^2}{\theta_2^2} \leq \frac{s_1^2}{s_2^2} f_{0.05,17} \quad (7)$$

**2.2.3. Ajuste del modelo:** Una vez se tienen los datos del último ciclo, se procede a realizar el ajuste a los modelos. Para tal objetivo se procede a realizar la gráfica de esfuerzo cortante contra razón de deformación según lo indica los modelos (Ec. (2) a Ec. (6)). Una vez se comprueba que se ajusta a dichos modelos se procede a calcular el esfuerzo mínimo de fluencia ( $\tau_o$ ) y la viscosidad plástica.

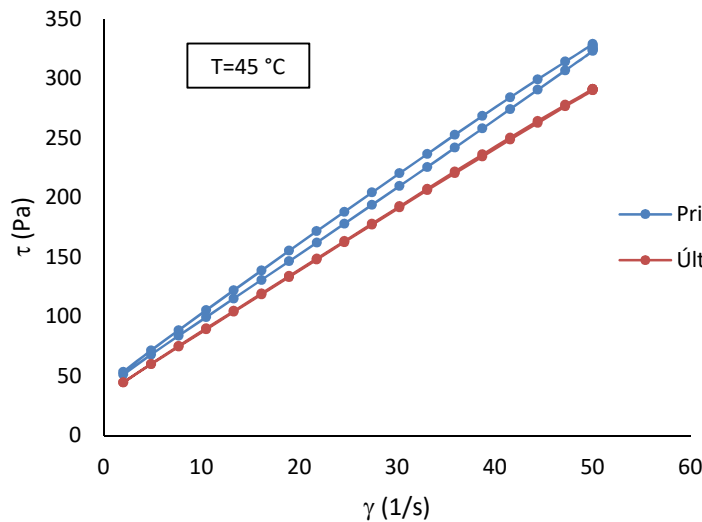
### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se seleccionaron cuatro muestras de estudio: dos de chocolate amargo de 70,0% p/p de licor de cacao (LC) y 57,0% p/p de LC, y dos de chocolate con leche de 36,0% p/p y 26,4% p/p de LC. Otras cuatro muestras con las mismas composiciones como patrón fueron también ensayadas con el fin de obtener una línea base de comparación.

#### 3.1. GRADO DE TIXOTROPÍA EN CHOCOLATE AMARGO Y CHOCOLATE CON LECHE

Todas las muestras de chocolate presentaron tixotropía y a medida que se repitieron los ciclos en forma consecutiva se fue eliminando; en el último ciclo de histéresis el grado de tixotropía fue despreciable como se muestra en la Figura 5 para la formulación de chocolate del 57,0% p/p LC con maltitol.

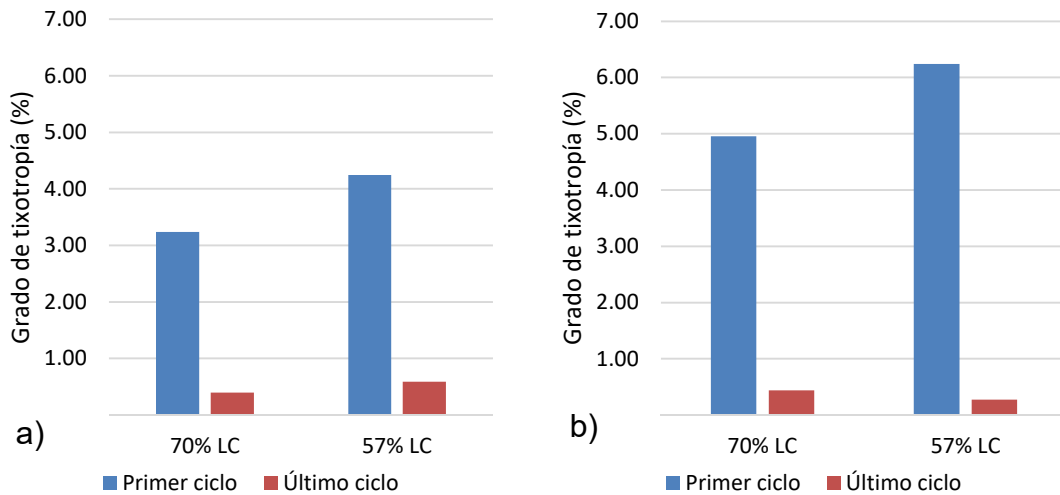
**Figura 5.** Ciclos de histéresis del chocolate amargo 57,0% LC con maltitol.



En la Figura 6, se muestran los resultados que indican el grado de tixotropía para el primer y último ciclo de histéresis para el chocolate amargo usando azúcar y maltitol respectivamente.

La Figura 6a y 6b muestra que el grado de tixotropía es inversamente proporcional a la concentración de LC lo que concuerda con los resultados reportados por Afoakwa, et al., (2008b). Este comportamiento se atribuye a la baja energía de interacción a bajas cantidades de grasa debido a la aglomeración de las partículas durante el cizallamiento. En los chocolates amargos, el edulcorado con azúcar presentó mayor grado de tixotropía, lo que indica que el tiempo para volver a la viscosidad inicial es mayor (Barnes, 2000). El grado de tixotropía en el último ciclo de cada formulación es despreciable.

**Figura 6.** Grado de tixotropía del chocolate amargo. a) Chocolate con maltitol, b) Chocolate con azúcar

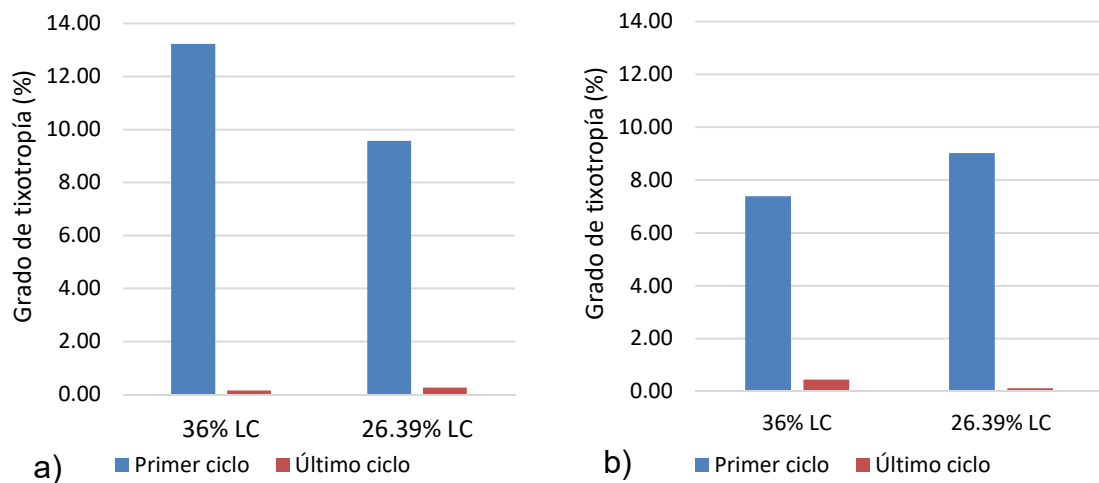


En cuanto al chocolate con leche, la Figura 7 muestra igualmente el valor final del grado de tixotropía estimado para el primer y último ciclo de histéresis. Como se observa de la Figura 7b para el chocolate con leche endulzado con azúcar, el grado

de tixotropía es también inversamente proporcional a la concentración de LC lo que está de acuerdo a los datos experimentales reportados por Afoakwa, *et al.*, (2008b). Sin embargo, para el chocolate con leche endulzado con maltitol, se observó el comportamiento contrario, es decir, el de mayor grado de tixotropía corresponde al chocolate con mayor concentración de LC (36,0% p/p LC), Figura 7a. Este aumento de tixotropía puede deberse a que el chocolate del 36,0%p/p LC haya presentado un mal mezclado, presentando un mal cubrimiento de las partículas sólidas con la grasa, lo que genera más tixotropía (Beckett, 2009), sin embargo se deben realizar más pruebas para verificar el resultado.

También hay que destacar que entre todas las muestras estudiadas, el chocolate con leche endulzado con maltitol es el que presentó mayor grado de tixotropía con aproximadamente un 13%, mientras que los demás estuvieron entre 4% y 8%. Esto indicaría que la mezcla leche maltitol en el chocolate requiere mayor cuidado en la etapa del mezclado o conchado. No obstante, una conclusión definitiva necesitaría de más estudio.

**Figura 7.** Grado de tixotropía del chocolate con leche. a) Chocolate con maltitol, b) Chocolate con azúcar

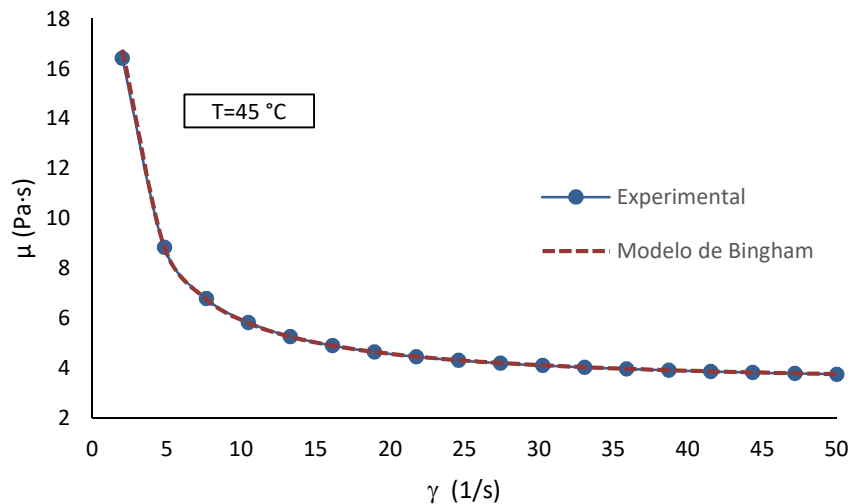


### 3.2. RESULTADOS REOLÓGICOS PARA MUESTRAS DE CHOCOLATE AMARGO.

Como se mencionó anteriormente, existen varios modelos de Newton generalizados para el ajuste de datos de esfuerzo cortante contra razón de deformación entre ellos los modelos de Herschel-Bulkley y Carreau, sin embargo, estos requieren graficar  $\log(\tau - \tau_0)$  vs  $\ln(\dot{\gamma})$  lo que implica usar un método directo para estimar los valores de  $\tau_0$ .

Por esta razón, se realizó el ajuste de datos a los modelos de Bingham, Casson y Casson modificado, mediante los cuales se obtuvieron los valores de  $\tau_0$  y  $\eta$  para chocolate amargo con presencia de maltitol y azúcar respectivamente. En la Figura 8 se puede apreciar el ajuste del modelo de Bingham para una muestra de chocolate amargo del 70,0% p/p LC con maltitol, el cual presenta una buena aproximación con los datos experimentales.

**Figura 8.** Viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate amargo del 70,0% LC con maltitol



Continuando con los análisis, la muestra de chocolate del 70% p/p LC presentó menor  $\eta_p$  y menor  $\tau_0$  que los determinados para las demás muestras ensayadas,

como se muestra en las Tablas 4 y 5. Siendo acorde con los estudios de Fernandes, *et al.*, (2013) donde concluyeron que al aumentar la cantidad de partículas sólidas se produce un aumento de los parámetros de  $\eta_p$  y  $\tau_o$ ; esto se debe a una mayor interacción entre las partículas sólidas en la fase continua de grasa.

El chocolate con maltitol tiene el menor valor para la  $\eta_p$  en los dos chocolates amargos. Este comportamiento puede deberse a que el maltitol no absorbe agua del medio, contrario al azúcar que si lo hace. También el maltitol presenta una cristalización más lenta que la del azúcar. (Sanchez, 2014; EPSA aditivos alimentarios), el cual es un efecto altamente positivo para el chocolate puesto que si hay presencia de humedad la viscosidad empieza a aumentar (Beckett, 2008; Afoakwa, *et al.*, 2007).

**Tabla 4.** Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate amargo con maltitol

Modelo	Maltitol					
	70% LC			57% LC		
	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
<b>Bingham</b>	27,0780	3,2305	1	35,7820	5,1230	0,9999
<b>Casson</b>	10,4342	2,1208	0,9955	12,1962	3,5744	0,9968
<b>Casson modificado</b>	14,1629	2,4706	0,9975	17,2047	4,0760	0,9984

**Tabla 5.** Viscosidad plástica y Esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate amargo con azúcar

Modelo	Azúcar					
	70% LC			57% LC		
	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
<b>Bingham</b>	9,7201	3,4361	0,9999	18,0650	5,2825	1
<b>Casson</b>	1,9785	2,8504	0,9978	4,1477	4,2547	0,9974
<b>Casson modificado</b>	3,3001	3,0559	0,9987	6,6511	4,6106	0,9984

El  $\tau_0$  en el chocolate con maltitol es mayor que su caso base. Según Fernandes, *et al.*, (2013) al aumentar el  $\tau_0$  existirá un aumento en la cantidad de energía para inicializar el flujo, por lo tanto el chocolate con maltitol requiere un mayor gasto de potencia para poner en movimiento el flujo en las tuberías o podría tener la sensación de ser más duro a la hora de ser “mordido” por el consumidor, por lo que este resultado debería ser evaluado en cuanto a la preferencias del consumidor

También se puede observar que un cambio similar en concentración de LC genera un cambio mayor en el valor de la de  $\tau_0$  para el chocolate con azúcar que con maltitol. Por ejemplo, al comparar los valores de  $\tau_0$  usando el modelo de Bingham, se observa que un cambio en 13% de LC genera un 25,34% aumento o disminución en el chocolate con maltitol respecto a un 46% de aumento o disminución en el chocolate con Azúcar.

### 3.3. RESULTADOS REOLÓGICOS PARA MUESTRAS DE CHOCOLATE CON LECHE

Se realizó igualmente el ajuste de datos de viscosidad aparente y esfuerzo de corte contra la velocidad de deformación para los modelos de Bingham, Casson y Casson modificado y los resultados se muestran en las Tablas 6 y 7.

**Tabla 6.** Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate con leche en presencia de maltitol

Modelo	Maltitol					
	36% LC			26,4% LC		
	$\tau_0$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>	$\tau_0$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
Bingham	27,4910	5,0377	1	33,5010	5,6965	0,9998
Casson	8,4286	3,6949	0,9959	11,0889	4,0610	0,9936
Casson modificado	12,3083	4,1400	0,9976	15,7998	4,5980	0,9960

**Tabla 7.** Viscosidad plástica y esfuerzo mínimo de fluencia del chocolate con leche en presencia de azúcar

Modelo	Azúcar					
	36% LC			26,4% LC		
	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>	$\tau_o$ (Pa)	$\eta$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
<b>Bingham</b>	11,7120	4,1229	1	28,7180	6,6823	0,9995
<b>Casson</b>	2,4602	3,4022	0,9974	6,8696	5,2822	0,9984
<b>Casson modificado</b>	4,0641	3,6548	0,9983	10,8349	5,7628	0,9992

El chocolate con 36,0% p/p de LC es el chocolate que contiene menor cantidad de sólidos por lo que presenta menor  $\eta_p$  y menor  $\tau_o$  tanto para el chocolate con maltitol y azúcar, el cual es acorde con los estudios realizados por Fernandes, *et al.*, (2013).

Por otro lado, el chocolate del 26,4% p/p de LC con maltitol presenta menor viscosidad aparente respecto al del azúcar, lo que concuerda con el caso para el chocolate amargo. Una explicación puede ser atribuida al hecho que el maltitol no absorbe agua del medio, y que presenta una cristalización más lenta que la del azúcar (Sanchez, 2014; EPSA aditivos alimentarios).

Sin embargo, en el chocolate con 36,0% p/p de LC se presentó un efecto contrario, es decir, el chocolate con azúcar presenta menor viscosidad aparente, este comportamiento pudo darse debido al proceso de manufactura ya que este afecta considerablemente la viscosidad del chocolate (Beckett 2009; Fernandes 2011; Afoakwa, 2010). Los chocolates con leche y maltitol presentaron mayor  $\tau_o$ .

### 3.4. SIMILITUDES AZÚCAR / MALTITOL

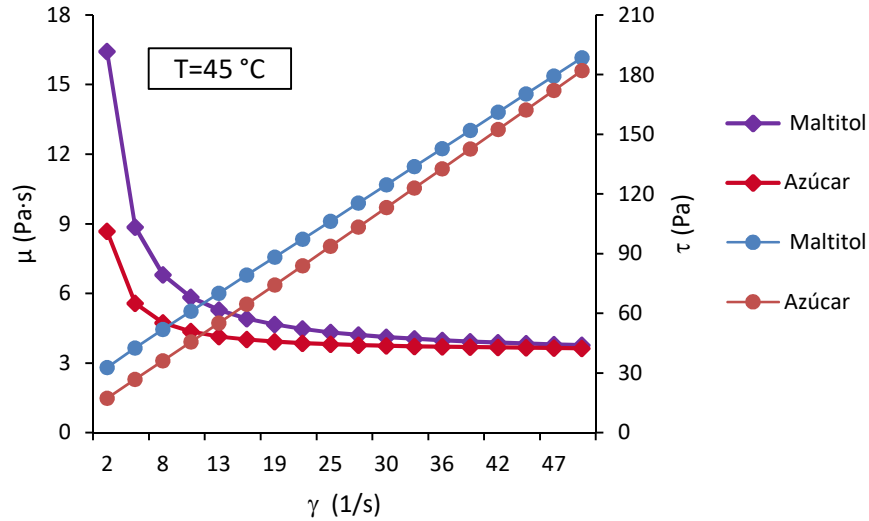
En la Figura 9 se muestran las curvas de esfuerzo y viscosidad aparente contra razón de deformación para los chocolates amargos del 70% p/p LC en presencia de maltitol y azúcar, donde se observa que las propiedades reológicas del chocolate con maltitol y azúcar son similares. Estos resultados están de acuerdo a las observaciones de Sokmen y Gunes (2006) y Afoakwa *et al.*, (2007) quienes concluyeron que las propiedades reológicas del chocolate con maltitol son similares a las propiedades reológicas del chocolate con azúcar.

Como se puede ver de la Figura 8, la diferencia en el valor de viscosidad aparente para chocolate amargo endulzado con maltitol y azúcar va desde 50% a un valor de  $\dot{\gamma} = 8 \text{ s}^{-1}$  hasta un 2% a  $\dot{\gamma} = 42 \text{ s}^{-1}$ . Esta diferencia cambia de acuerdo a cada una de las formulaciones de chocolate, variando desde un 2% hasta un 34% dependiendo del chocolate, como se muestra en la Tabla 8.

En el anexo C se pueden observar las curvas de esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación correspondientes a los diferentes chocolates amargos y chocolates con leche, e igualmente en el anexo D se puede ver la viscosidad aparente y esfuerzo para cada una de las formulaciones a bajas y altas razones de deformación.

En conclusión el maltitol incrementa la viscosidad del chocolate especialmente a bajas razones de deformación. Como ya hemos mencionado, se debe verificar el efecto de este cambio sobre la calidad del chocolate o sobre la percepción sensorial del mismo por parte del consumidor.

**Figura 9.** Esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate amargo en presencia de azúcar o maltitol al 70,0% p/p LC ( —●— Representa curva de esfuerzo, —◆— representa curva de viscosidad).



**Tabla 8.** Razón de cambio de viscosidad y esfuerzo de deformación

Formula	RAZÓN DE DEFORMACIÓN DE 42 s <sup>-1</sup>				RAZÓN DE DEFORMACIÓN 8 s <sup>-1</sup>			
	70,0%	57,0%	36,0%	26,4%	70,0%	57,0%	36,0%	26,4%
Viscosidad (%)	5	4	23	12	31	21	34	2
Esfuerzo (%)	5	4	23	12	30	21	34	2

Por último se quiere resaltar, que a pesar de que el modelo de Casson es uno de los más utilizados en la industria del chocolate, por dar un buen ajuste en comportamiento reológico a velocidades de corte de 2 s<sup>-1</sup> a 50 s<sup>-1</sup> (IOCC2000; Gonçalves y Lannes, 2010), en este trabajo el modelo que mejor se ajusta es el modelo de Bingham como se muestra de la Tablas 3 a la Tabla 6 para chocolate amargo y chocolate con leche.

#### 4. CONCLUSIONES

- En los chocolates amargos el mayor grado de tixotropía lo presentó los chocolates con azúcar, mientras que en los chocolates con leche el mayor grado de tixotropía lo presentó el chocolate con maltitol.
- A pesar que el modelo de Casson es el más utilizado en la industria de chocolatería, en este trabajo el modelo de Bingham presentó el mejor ajuste para las muestras de chocolate estudiadas inclusive las que incorporan el maltitol.
- Al disminuir la concentración de cacao en las formulaciones, se presentó un aumento en la viscosidad y del esfuerzo mínimo de fluencia para todas las muestras de chocolate.
- Los chocolates con maltitol tanto amargos como con leche a 45°C, presentan una menor viscosidad plástica, lo cual genera una menor resistencia al flujo. Excepto la muestra de chocolate del 36% p/p LC que presentó una mayor viscosidad plástica.
- El chocolate con maltitol presenta un mayor esfuerzo mínimo de fluencia, para el cual se requiere de un mayor esfuerzo para poner en movimiento las partículas, generando de esta manera un mayor gasto de potencia para inicializar el flujo de chocolate en las tuberías del proceso.
- El uso de maltitol en la producción de chocolates de cobertura si genera un efecto significativo en las propiedades reológicas como viscosidad y esfuerzo mínimo de fluencia especialmente a bajas razones de deformación.

## 5. RECOMENDACIONES

- Realizar la medición de humedad y verificar su efecto sobre las propiedades reológicas de cada una de las muestras de chocolate.
- Realizar pruebas reológicas utilizando valores más bajos de razón de deformación y hacer pruebas directas para calcular el esfuerzo mínimo de fluencia, con el fin de conocer los parámetros necesarios para el ajuste de los modelos como lo son Carreau y Herschel-Bulkley, para tener un mejor ajuste de los datos a los diferentes modelos reológicos estandarizados en la industria del chocolate.
- Realizar las pruebas experimentales a diferentes temperaturas, y estudiar su efecto en el ajuste de los diferentes modelos.
- Utilizar un conjunto plato cono o un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos, para obtener una mejor aproximación de los resultados, teniendo en cuenta que son los más recomendados por la industria.
- Evaluar las propiedades reológicas del chocolate con el uso de otros agentes de volumen.
- Realizar un escalado, y de esta manera evaluar el efecto del conchado en las propiedades reológicas del chocolate.
- Medir la textura y dureza del producto final, con el fin de verificar el efecto del maltitol en las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

AFOAKWA, Emanuel. Chocolate Science and Technology. 2010, ISBN 978-1-4051-9906-3

AFOAKWA, Emanuel; PATERSON, Alistair; FOWLER, Mark. Characterization of melting properties in dark chocolates from varying particle size distribution and composition using differential scanning calorimetry. Food Research International. 2008a, nro. 41. p. 751-757.

AFOAKWA, Emanuel, PATERSON, Alistair; FOWLER, Mark. Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate. Eur Food Res Technol. 2008b, nro. 226. p. 1259–1268.

AFOAKWA, Emanuel, PATERSON, Alistair; FOWLER, Mark. Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate. A review. Trends in food Science and Technology. 2007, nro. 18. p. 290-298.

ARDAKANI, Hesam; MITSOULIS, Evan; HATZIKIRIAKOS; Savvas. Capillary flow of milk chocolate. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2014, nro. 210. p. 56–65

BARNES, Howard. A handbook of elementary rheology. 2000. ISBN 0-9538032-0-1

BECKETT, Stephen. Industrial Chocolate Manufacture and use. Formerly Nestlé. Fourth Edition. 2009, Reino Unido.

BECKETT, Stephen. The science of Chocolate. The Royal Society of Chemistry. 2008, Cambridge.

BENCHABENE, Adel; BEKKOUR; Karim. Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. Colloid Polym Sci. 2008, nro. 286. p. 1173–1180

CHAPRA, Steven. Metodos numéricos para ingenieros. Quinta edicion, ISBN 978-970-10-6114-5.

EPSA, Aditivos alimentarios

FERNANDES, Vanessa; MÜLLER, Alejandro; SANDOVAL, Aleida. Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions. Journal of Food Engineering. 2013, nro. 116. p. 97–108

FERNANDES, Vanessa Auxiliadora. Evaluacion de las propiedades reologicas y termicas de diferentes composiciones de chocolate . s.l. Universidad Simon Bolivar, 2011

GLICERINA, Virginia, *et al.* Microstructural and rheological characteristics of dark, milk and white chocolate: A comparative study. Journal of Food Engineering. 2016, nro. 169. p. 165-171

GLICERINA, Virginia; BALESTRA, Federica; DALLA ROSA, Marco; ROMANI, Santina. Effect of manufacturing process on the microstructural and rheological properties of milk chocolate. Journal of Food Engineering. 2015, nro. 145. p. 45-50.

GONÇALVES, Estela; LANNES, Suzana. Chocolate rheology. Ciencia e Tecnologia de Alimentos. 2010, nro.30. p. 845–851

IOCCC, 2000. Viscosity of Cocoa and Chocolate Products. Analytical Method 46-2000. International Office of Cocoa. Chocolate and Confectionary, Geneva.

MÉNDEZ, Arturo; PÉREZ, Leonor; PANIAGUA, Ana. Determinación de la viscosidad de fluidos Newtonianos y no Newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette), Lat. Am. J. Phys. Educ. 2010, nro. 4.

MONTGOMERY, Douglass; RUNGER, George. Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería; MCGRAW-HILL.

RAO, Anandha. Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications. 2 ed. New York: 2007. ISBN 13: 978-0-387-70929-1

REYO, Agustín. Desarrollo de formulaciones de productos de confitería de bajo aporte calórico utilizando alcoholes polihídricos como edulcorantes. EN: XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Guanajuato. 2010.

SÁNCHEZ, Magaly. Edulcorantes: utilizacion y aprovechamiento en diferentes procesos de la industria alimentaria. Universidad Autónoma del Estado de México. 2014.

SOKMEN, Ahmet; GUNES, Gurbuz. Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate. Food Science and Technology. 2006, nro. 39. p. 1053-1058.

TALBOT, G. Chocolate temper. En Industrial chocolate manufacture and use. Beckett S.T. Oxford. 2009

TAYLOR, J.E; VAN DAMME, I; JOHNS, A.F. Shear Rheology of Molten Crumb Chocolate. Food Engineering and Physical Properties. 2009, nro. 74. p. 55-62.

## ANEXOS

**Anexo A.** Verificación de repetitividad para cada una de las formulaciones de chocolate con maltitol y azúcar.

**Tabla A. 1.** Desviación estándar para muestras con maltitol

MALTITOL				
Muestras	Esfuerzo (Pa)	Desviación (%Pa)	Intervalo Inferior (Pa)	Intervalo Superior (Pa)
70,0% LC	188,55	1,63	186,92	190,18
57,0% LC	290,05	4,45	285,60	294,50
36,0% LC	279,30	4,67	274,63	283,97
26,4% LC	318,50	0,56	317,94	319,06

**Tabla A. 2.** Desviación estándar para muestras de chocolate con azúcar

AZÚCAR				
Muestras	Esfuerzo (Pa)	Desviación (%Pa)	Intervalo Inferior (Pa)	Intervalo Superior (Pa)
70,0% LC	182,10	1,13	180,97	183,23
57,0% LC	282,75	2,19	280,56	284,94
36,0% LC	218,90	1,27	217,63	220,17
26,4% LC	357,75	3,60	354,15	361,35

## Anexo B. Ciclo de histéresis

Las ocho muestras de chocolate presentaron tixotropía y el número de ciclos consecutivos para eliminar la tixotropía varió con la composición del chocolate y el tipo de agente de volumen utilizado. A continuación se presentan las tablas donde se reporta el número de ciclos que se aplicó a las muestras de chocolate para eliminar la tixotropía y las curvas de los ciclos de histéresis del primer y último ciclo para cada una de las muestras de chocolate.

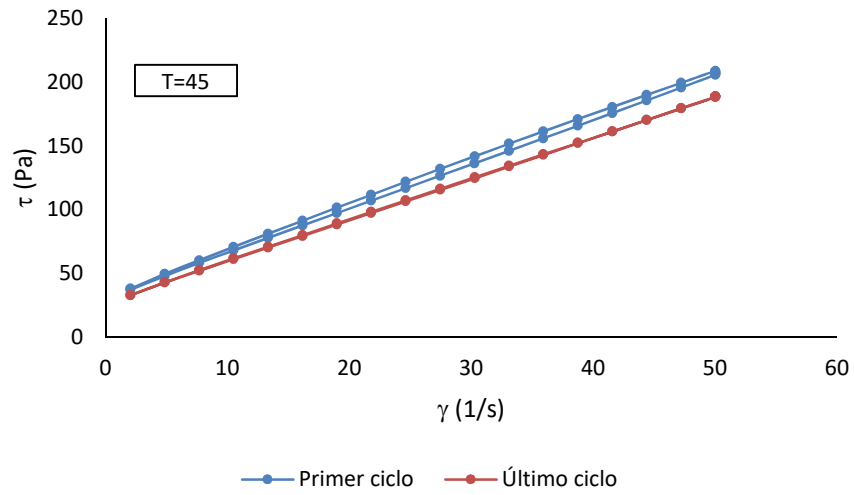
**Tabla B. 1.** Área entre las curvas de histéresis y número de ciclos consecutivos aplicados para eliminar la tixotropía del chocolate amargo.

Muestra de chocolate	Chocolate con maltitol			Chocolate con azúcar		
	Área entre la curva primer ciclo (Pa)	Área entre la curva último ciclo (Pa)	Número de ciclos	Área entre la curva primer ciclo (Pa)	Área entre la curva último ciclo (Pa)	Número de ciclos
70,0% LC	195,5757	21,2889	14	282,3141	20,7332	11
57,0% LC	396,6156	47,6275	14	551,5524	20,4809	7

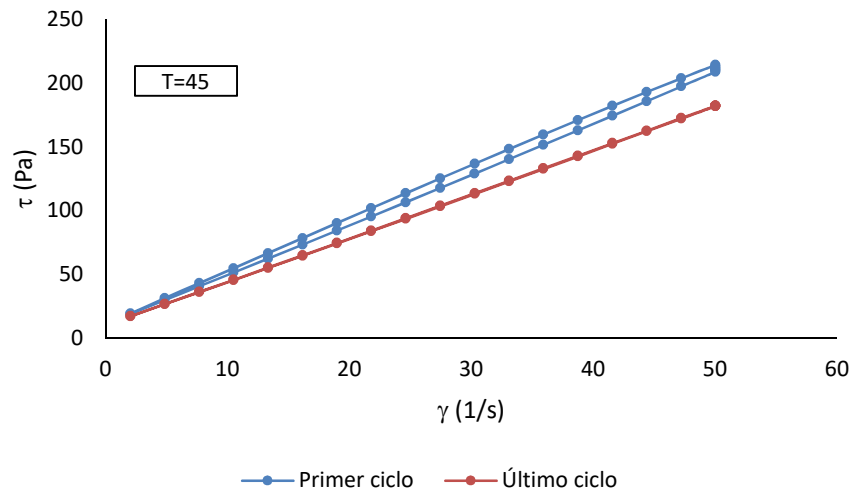
**Tabla B. 2.** Área entre las curvas de histéresis y número de ciclos consecutivos aplicados para eliminar la tixotropía del chocolate con leche.

Muestra de chocolate	Chocolate con maltitol			Chocolate con azúcar		
	Área entre la curva primer ciclo (Pa)	Área entre la curva último ciclo (Pa)	Número de ciclos	Área entre la curva primer ciclo (Pa)	Área entre la curva último ciclo (Pa)	Número de ciclos
36,0% LC	1504,0820	12,1583	15	532,1090	26,0192	18
26,4% LC	1126,6381	23,1698	14	1146,3480	12,5906	11

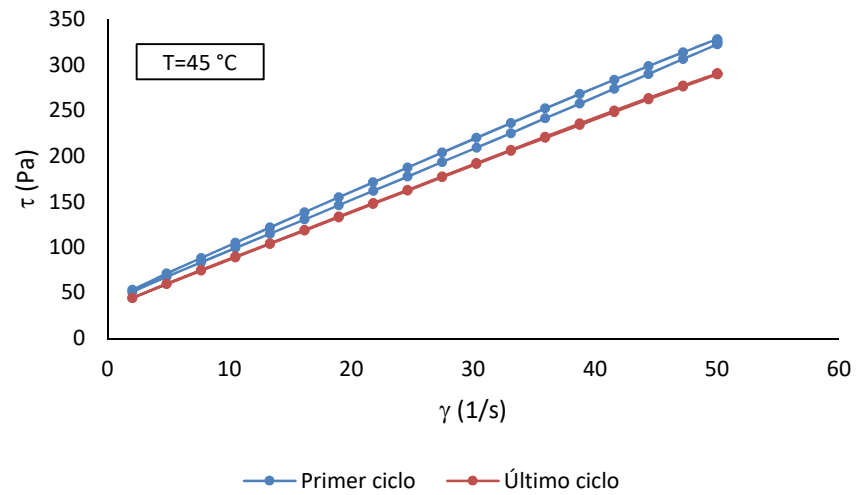
**Figura B. 1.** Ciclo de histéresis chocolate amargo 70,0% LC con maltitol



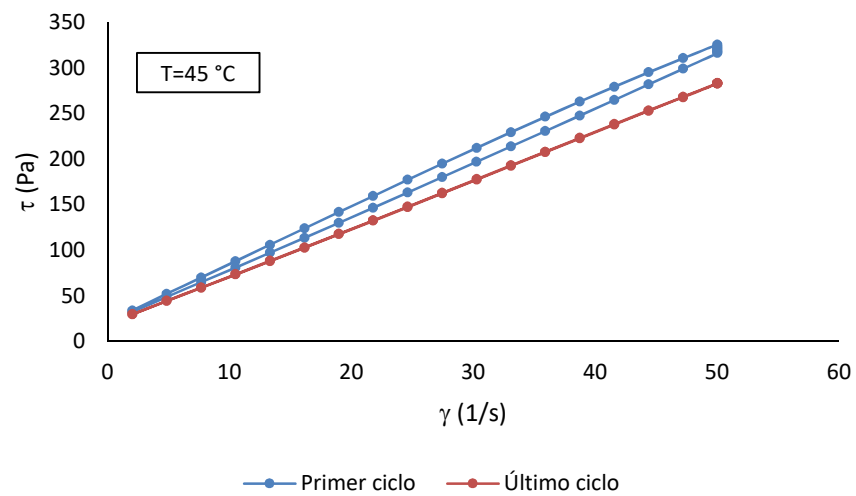
**Figura B. 2.** Ciclo de histéresis chocolate amargo 70,0% LC con azúcar



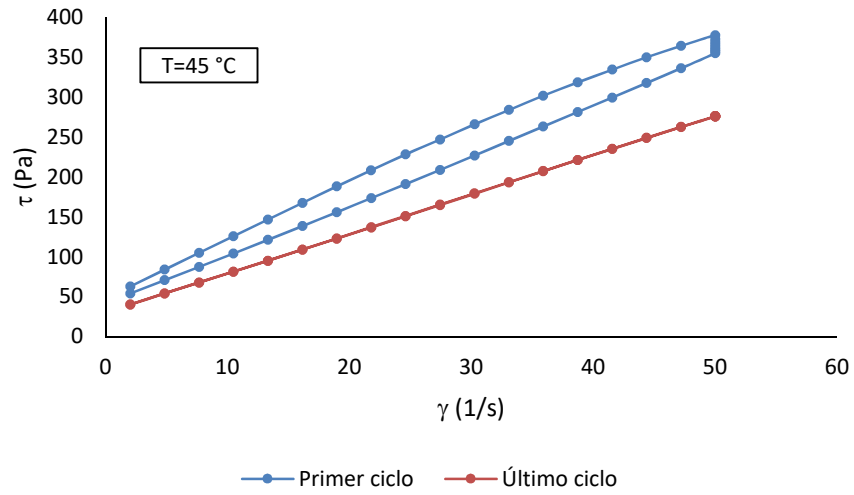
**Figura B. 3.** Ciclo de histéresis chocolate amargo 57,0% LC con maltitol



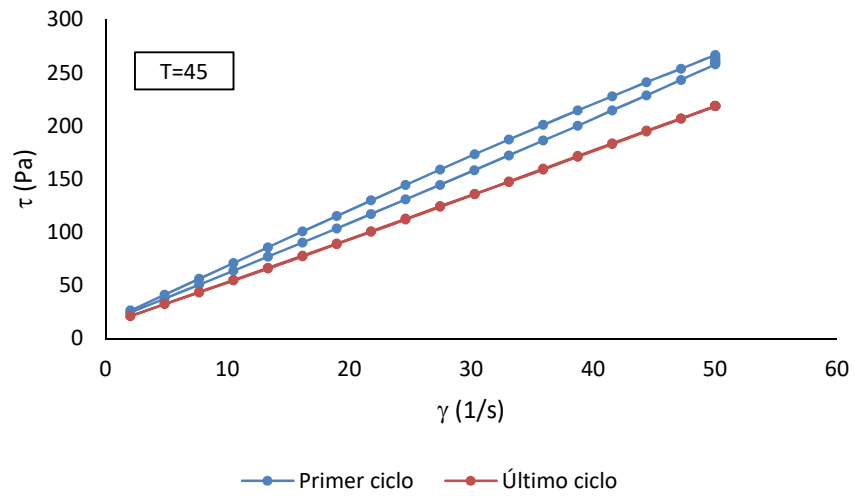
**Figura B. 4.** Ciclo de histéresis chocolate amargo 57,0% LC con azúcar



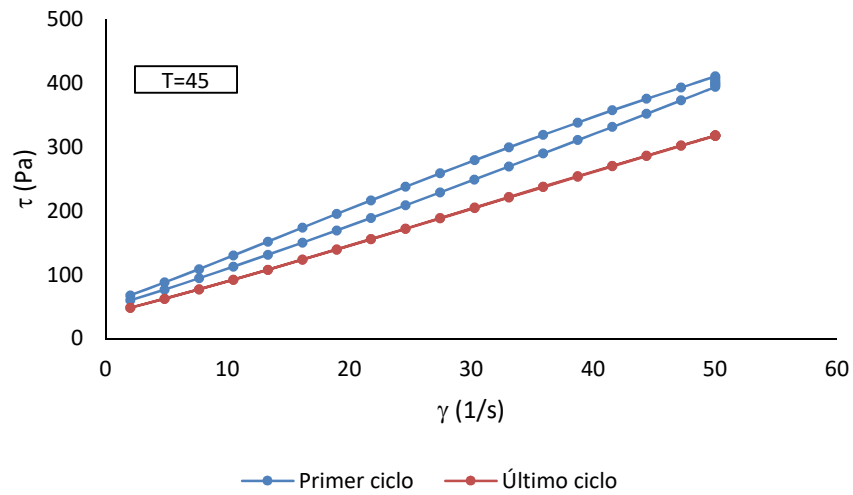
**Figura B. 5.** Ciclo de histéresis chocolate con leche 36,0% LC con maltitol



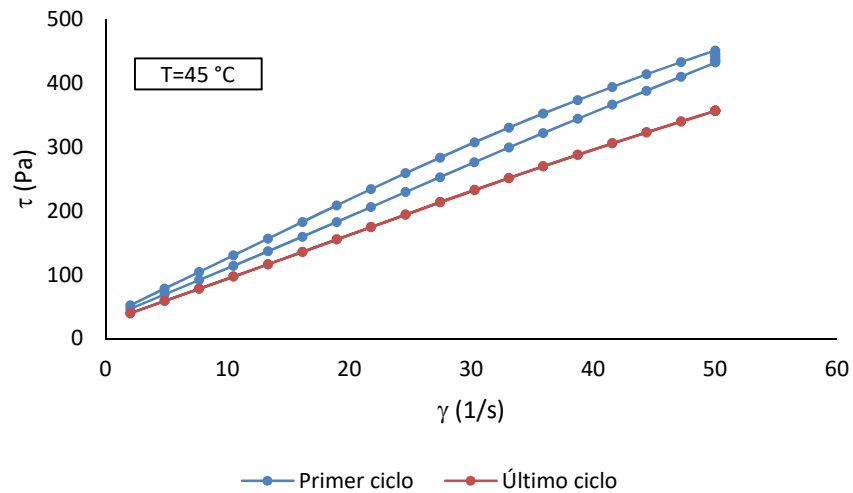
**Figura B. 6.** Ciclo de histéresis chocolate con leche 36,0% LC con azúcar



**Figura B. 7.** Ciclo de histéresis chocolate con leche 26,4% LC con maltitol



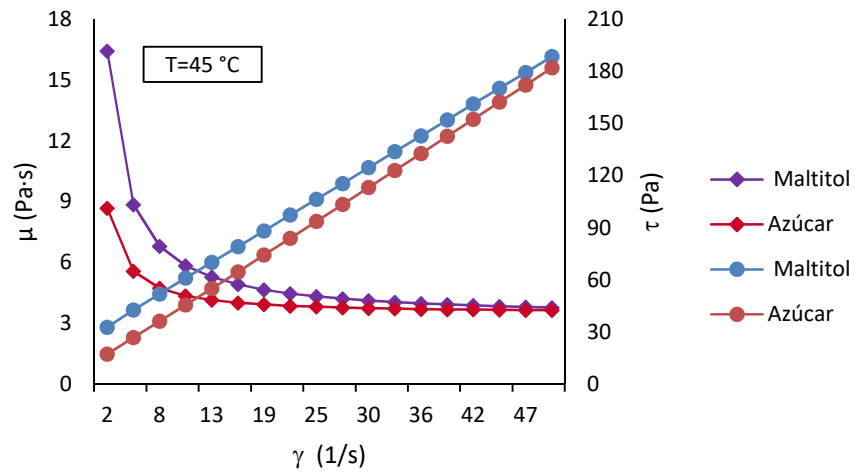
**Figura B. 8.** Ciclo de histéresis chocolate con leche 26,4% LC con azúcar



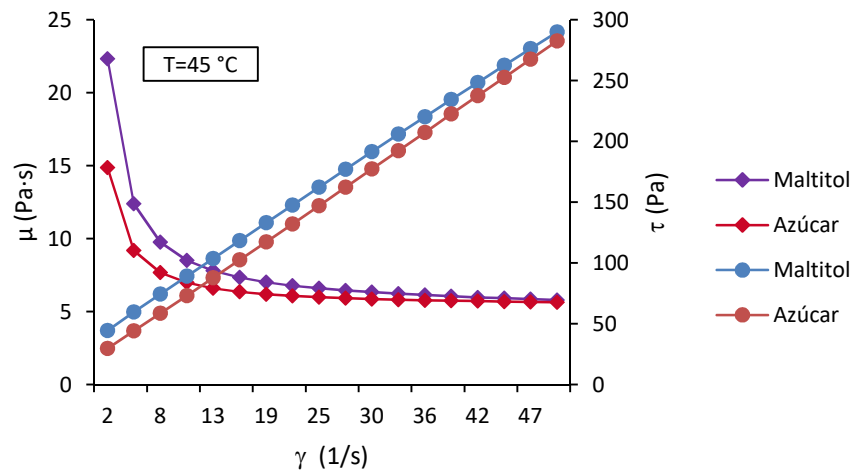
**Anexo C.** Curvas de esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación.

**Figura C. 1.** Esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate amargo en presencia de azúcar o maltitol ( **—●—** representa curva de esfuerzo, **—◆—** representa curva de viscosidad). a) Chocolate 70,0%LC, b) Chocolate 57,0% LC

a)

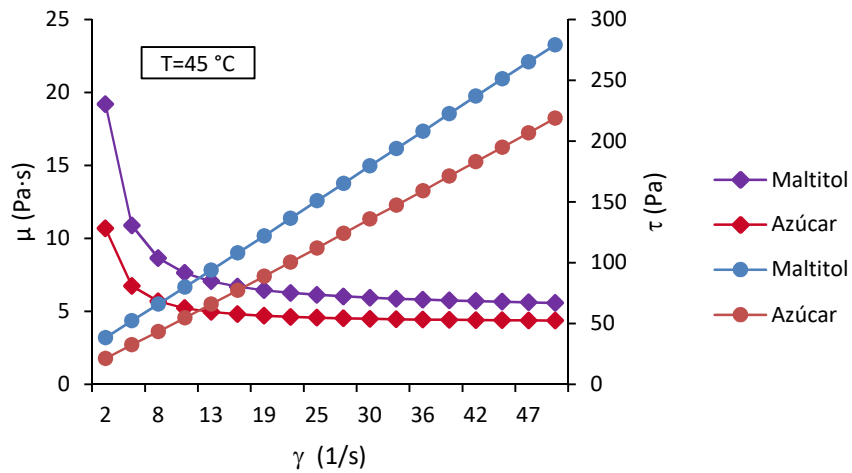


b)

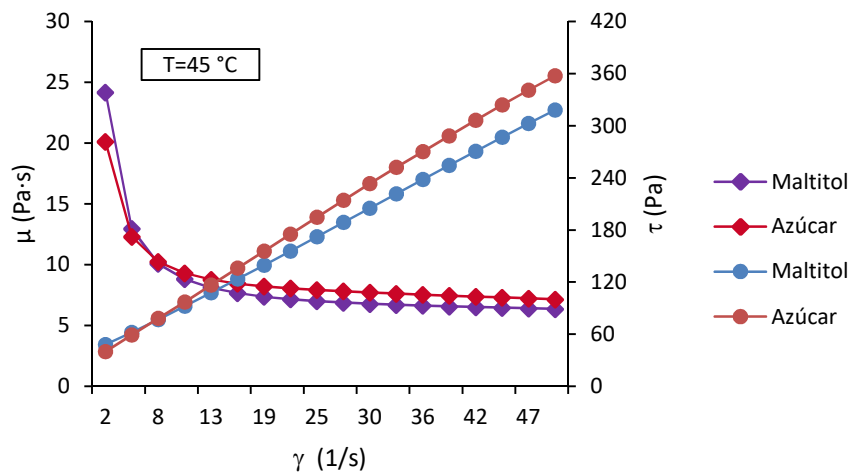


**Figura C. 2.** Esfuerzo de deformación y viscosidad aparente contra razón de deformación de chocolate con leche en presencia de azúcar o maltitol (  $\text{---}\bullet\text{---}$  representa curva de esfuerzo,  $\text{---}\blacklozenge\text{---}$  representa curva de viscosidad). a) Chocolate 36,0% LC, b) Chocolate 26,4% LC

a)



b)



Las Figuras C1 y C2 representan los datos de esfuerzo y viscosidad aparente contra razón de deformación, obtenidos en el último ciclo de histéresis de cada muestra de chocolate, el cual es donde el valor de viscosidad no varía con el tiempo.

## Anexo D. Viscosidad y esfuerzo a bajas y altas razones de deformación

**Tabla D. 1.** Relación viscosidad y esfuerzo a razones de deformación bajas  $8s^{-1}$

	CHOCOLATE CON MALTITOL				CHOCOLATE CON AZÚCAR			
	70%	57%	36%	26,4%	70%	57%	36%	26,4%
VISCOSIDAD (Pa·s)	6,8	9,7	8,6	10,09	4,7	7,7	5,7	10,3
ESFUERZO (Pa)	52,02	74,6	66,2	77,2	36,2	58,7	43,6	78,4

**Tabla D. 2.** Relación viscosidad y esfuerzo a razones de deformación altas  $42s^{-1}$

	CHOCOLATE CON MALTITOL				CHOCOLATE CON AZÚCAR			
	70%	57%	36%	26,4%	70%	57%	36%	26,4%
VISCOSIDAD (Pa·s)	3,9	6,0	5,7	6,5	3,7	5,7	4,4	7,4
ESFUERZO (Pa)	161,3	248,6	237,1	270,9	152,6	237,7	183,2	306,7