



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Propiedades viscoelásticas y de flujo de diferentes yogures bebibles comerciales

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

ARIANA WENDOLYNE RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

ASESORAS:

DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA

DRA. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2020



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis.

Propiedades viscoelásticas y de flujo de diferentes yogures bebibles comerciales.

Que presenta la pasante: Ariana Wendolyne Rodríguez Hernández

Con número de cuenta: 414083051 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 25 de Noviembre de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	
VOCAL	<u>Dra. María Eugenia Ramírez Ortiz</u>	
SECRETARIO	<u>Dra. María Guadalupe Sosa Herrera</u>	
1er. SUPLENTE	<u>I.A. Verónica Romero Arteola</u>	
2do. SUPLENTE	<u>M. en C. Fátima Abigail Galván Ballesteros</u>	

NOTA: los síndicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).



Dedicatorias

A Dios por estar a mi lado en cada etapa de mi vida.

A mis padres Juana Hernández Martínez y Juan Manuel Rodríguez Navarro por todos los sacrificios que han hecho por mí, por su confianza, consejos, y motivación que me han brindado sin la cual no habría llegado hasta aquí.

A mis hermanos Jacqueline y Juan Manuel por su tiempo, su apoyo y cariño incondicional

A mis asesoras Dra. Laura Patricia Martínez Padilla y Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes, por su paciencia, tiempo y dedicación.

A toda mi familia por el apoyo que me brindaron.

A mis amigos y compañeros por todos esos buenos momentos, especialmente a Mimi, Montse, Aby y Payan por esas desvelas y por hacer de las clases algo más ameno.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me brindo los elementos necesarios para mi formación. Especialmente a toda la comunidad de LAPRYFAL por prestarme sus instalaciones, brindarme su apoyo en todo momento y por ser parte de este proyecto.

Finalmente, a todas aquellas personas que en algún momento formaron parte directa o indirectamente de esta etapa de mi vida.

Con amor y respeto

Ariana Wendolyne Rodríguez Hernández



Agradecimientos

A la DGAPA, UNAM, Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, PAPIME PE104817 “Material didáctico y aplicaciones digitales de reología para reforzar el proceso de enseñanza-aprendizaje del Taller Multidisciplinario de Ingeniería en Alimentos opción Reología y Textura de Alimentos”, por la beca recibida.

Con mucho respeto

Ariana Wendolyne Rodríguez Hernández

ÍNDICE

Página

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I ANTECEDENTES

1.1 Yogur	1
1.1.2 Proceso de elaboración del yogur	2
1.2 Composición química del yogur bebible	7
1.3 Beneficios del consumo de yogur	9
1.4 Reología del yogur bebible	10
1.5 Evaluación del comportamiento reológico	13
1.5.1 Comportamiento al flujo	14
1.5.2 Comportamiento viscoelástico	17

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Objetivos	21
2.2 Materiales	22
2.3 Métodos	23
2.3.1 Determinación de propiedades fisicoquímicas	23
2.3.2 Determinación de densidad	24
2.3.3 Estudio reológico bajo cizalla oscilatoria	24
2.3.4 Determinación del comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional	25

2.3.4.1 Esfuerzo de cedencia	26
2.3.4.2 Dependencia del tiempo de cizallamiento	28
2.3.4.3 Curva de flujo	28
2.3.5 Análisis estadístico	29

CAPÍTULO III RESULTADOS

3.1 Propiedades fisicoquímicas de diferentes yogures bebibles comerciales	30
3.2 Densidad de diferentes yogures bebibles comerciales	31
3.2 Estudio reológico bajo cizalla oscilatoria	32
3.3 Comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional	35
3.3.1 Esfuerzo de cedencia	35
3.3.2 Dependencia del tiempo de cizallamiento	38
3.3.3 Curva de flujo	43

CONCLUSIONES	53
---------------------	-----------

REFERENCIAS	56
--------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Diagrama de proceso para la elaboración de yogur bebible.	2
1.2	Efecto de la homogenización en la distribución de la grasa.	5
1.3	Curva de flujo para fluidos no-newtonianos.	14
1.4	Comportamiento de fluidos tixotrópicos.	16
1.5	Comportamiento de fluidos tixotrópicos a velocidad de cizalla constante.	16
2.1	Región viscoelástica lineal en un barrido de deformación.	25
2.2	Deformación en función del esfuerzo de cizalla.	27
2.3	Curva de flujo a bajas velocidades de cizalla.	28
3.1	Módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la deformación aplicada.	33
3.2	Módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la frecuencia angular.	33
3.3	Deformación en función del esfuerzo de cizalla.	36
3.4	Curva de flujo a bajas velocidades de cizalla.	37
3.5	Viscosidad en función del tiempo a velocidad constante.	39
3.6	Curva de flujo de yogur comercial YB1.	43
3.7	Curva de flujo de yogur comercial YB2.	44
3.8	Curva de flujo de yogur comercial YB3.	44
3.9	Curva de flujo de yogur comercial YB4.	45
3.10	Relación de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla.	48
3.11	Viscosidad en función del tiempo de aplicación para la condición a velocidad de cizalla constante ($\dot{\gamma} = 1000 \text{ s}^{-1}$).	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Contenido nutrimental de yogur comercial sabor fresa.	8
3.1	Propiedades fisicoquímicas de diferentes yogures bebibles comerciales a 25 °C.	30
3.2	Densidad relativa de diferentes yogures bebibles comerciales.	32
3.3	Valores del módulo de almacenamiento (G') y el módulo pérdida (G'') a una frecuencia angular de 1 rad/s.	34
3.4	Valores de esfuerzos de cedencia obtenidos por dos métodos.	37
3.5	Valores de viscosidad (Pa.s) a diferentes velocidades de cizalla y tiempos de aplicación ($\Theta_o = 10$ s, $\Theta_f = 400$ s) sobre la misma muestra.	40
3.6	Parámetros para el modelo de Weltman.	41
3.7	Área del bucle de histéresis.	46
3.8	Parámetros reológicos del modelo Herschel-Bulkley para la curva de ascenso de velocidad de cizalla.	47
3.9	Parámetros para el modelo de Weltman.	50
3.10	Parámetros reológicos para la curva de descenso de velocidad de cizalla.	51

RESUMEN

En la presente investigación se analizó el comportamiento viscoelástico y de flujo para cuatro diferentes yogures bebibles comerciales de sabor fresa mediante estudios de cizalla oscilatoria y rotacional considerando para el análisis de las propiedades fisicoquímicas (índice de refracción y pH), la densidad, la composición reportada en la etiqueta, así como los estabilizantes utilizados. En cuanto al comportamiento viscoelástico mediante pruebas dinámicas se apreció que predomina el módulo de almacenamiento al compararlo con el módulo de pérdida, es decir, que se comporta más como un sólido en todas las muestras de yogur. Por otro lado, el comportamiento al flujo fue estudiado mediante la aplicación de cizalla rotacional, en el que se apreció que las muestras presentaron un esfuerzo de cedencia, el cual se determinó mediante dos métodos estáticos, sin encontrar diferencias significativas estadísticamente entre los valores determinados por cada uno de los métodos. Además, por medio del modelo de Weltman se evaluó la dependencia con el tiempo de cizallamiento a través de la aplicación de cizallamiento constante, donde la constante B indicó que la muestra de yogur YB1 sufrió más daño estructural. Por otro lado, las muestras presentaron un bucle de histéresis en la curva de flujo, característico a materiales tixotrópicos donde las muestras YB2 y YB3 presentaron menor área y por ende menor grado de tixotropía. Se observó que el yogur también es fluidificante a la cizalla, por lo cual la curva de ascenso de la velocidad de cizalla fue descrita por el modelo de Herschel Bulkley, donde el esfuerzo de cedencia muestra mayores valores en las muestras que reportan mayor índice de refracción, mientras que, para la curva de descenso de la velocidad de cizalla. La muestra YB2 fue descrito por el modelo de Ostwald de Waele, y las muestras de yogur YB4, YB3 y YB1 fueron descritos por el modelo Herschel-Bulkley. Las propiedades reológicas de las muestras de yogur se ven afectadas por su composición, sus propiedades fisicoquímicas y agentes que utilizan como estabilizantes. Las muestras presentaron comportamiento viscoelástico, un comportamiento fluidificante a la cizalla y dependiente del tiempo de cizallamiento (tixotrópico).

INTRODUCCIÓN

El yogur es un alimento de importancia a nivel mundial y su consumo ha ido en aumento en los últimos años ganando popularidad entre las mujeres jóvenes, debido a que tiene propiedades nutricionales y funcionales que benefician la salud del consumidor (García-Garibay *et al.*, 1993; Vásquez-Villalobos *et al.*, 2015). Los alimentos funcionales como las bebidas lácteas fermentadas tienen beneficios en el organismo como es restaurar y fortalecer la microbiota, prevención de cáncer de colon y mejoramiento de la flora intestinal (Huertas-Parra, 2012).

Las propiedades reológicas de los productos lácteos son útiles para el diseño en el transporte en tuberías, en diversas operaciones durante el procesamiento (calentamiento, refrigeración, pasteurización, secado, entre otros), para el control de calidad y el desarrollo de nuevos productos, por lo cual se requiere determinar la viscosidad o los parámetros que definen la curva de flujo o el carácter viscoelástico (Steffe, 1996). Además, dichas propiedades son características de cada producto y están relacionadas con la calidad del mismo y condicionan la aceptación por los consumidores (Liu, *et al.*, 2017).

A pesar de la importancia que tiene el estudio de las propiedades reológicas, existe una amplia variedad de técnicas que pueden utilizarse para analizar diferentes propiedades de los fluidos complejos como el yogur (Haque, *et al.*, 2001), por lo que se han reportados datos experimentales relacionados con las propiedades viscoelásticas, la determinación del bucle de histéresis en la curva de flujo, el ajuste a modelos de Ostwald de Waele o Herschel Bulkley en las curvas de ascenso de velocidad de cizalla y el modelo de Weltman para describir la dependencia del tiempo de cizallamiento, en yogur firme o batido (Liu *et al.*, 2017; Rohm y Kovač, 1995).

Sin embargo, no existen suficientes datos experimentales sobre productos comerciales, que hayan sido evaluados por diferentes técnicas para realizar una

comparación que permita definir cuál es el método de caracterización reológica más adecuado a utilizar dependiendo de lo que se desea analizar.

Por lo anterior, es de suma importancia caracterizar la reología de yogur bebible comercial por medio de estudios bajo cizalla oscilatoria y rotacional, con la finalidad de obtener datos experimentales que permitan evaluar las propiedades reológicas de un fluido por diversos métodos y por medio de esto se pueda analizar lo que se obtiene de cada técnica, así como la utilidad que tiene cada una, para ello se utilizarán cuatro muestras diferentes de yogur bebible comercial sabor fresa.

Como parámetros de control se considerará la influencia que tiene la densidad, el índice de refracción y el pH de dichos productos, además de su formulación, tomando en cuenta que es un fluido que puede presentar propiedades viscoelásticas y dependencia del tiempo de cizallamiento (tixotropía).

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Yogur

El yogur es la bebida láctea fermentada para consumo directo más conocida (Palencia, 2001) esencialmente se obtiene a partir de la fermentación de la leche por acción de ciertas bacterias (*Streptococcus termophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*), las cuales transforman la lactosa en ácido láctico (Tamime y Robinson, 2007) lo que proporciona la acidez y olor característico del yogur.

Las bebidas lácteas son productos que se fabrican a partir de la leche o de sus componentes (Vasseur, 1960), dichos productos pueden obtenerse por procedimientos como homogenización y batido; también deben contarse aquellos basados en la adición de espesantes y emulsionantes, que permite fabricar productos lácteos líquidos y batidos de mayor viscosidad (Silva-Rubio *et al.*, 2013), dichas bebidas se pueden dividir en dos grandes grupos: bebidas lácteas fermentadas y no fermentadas. Las bebidas lácteas no fermentadas son derivados de la leche a los que se les ha modificado el contenido graso, el valor nutricional o el sabor, entre otros (Aportela-Palacios *et al.*, 2005), mientras que las bebidas lácteas fermentadas, se venden bajo las denominaciones "alimento lácteo fermentado" o "producto lácteo fermentado" (Ratner *et al.*, 2017) y se obtienen por medio de la acción de microorganismos (CODEX STAN 243-2003) que fermentan la lactosa de la leche y originan características sensoriales específicas en el producto (Palencia, 2001).

Uno de los atributos más importantes del yogur es su textura, así como sus características de consistencia y viscosidad, la cual puede determinar su aceptación o rechazo por parte de los consumidores (Pauletti *et al.*, 2003) además de influir en la calidad del producto (Basiri *et al.*, 2018), esto es debido a la estructura del yogur que es una red tridimensional de proteínas formada por micelas de caseína que atrapan los glóbulos de grasa, donde la matriz de caseína es relativamente débil; por consiguiente, la composición de la leche especialmente el contenido de grasa y proteínas tiene un importante efecto sobre el comportamiento reológico del yogur (Iličić *et al.*, 2013).

Existen distintos tipos de yogur que varían en su consistencia, sabor y aroma, cada uno requiere de un tratamiento tecnológico diferente (Gil, 2010), en este sentido se pueden diferenciar tres tipos:

Yogur firme: en el cual la incubación de las bacterias ácido lácticas y el enfriamiento se realizan directamente en el envase (Gil, 2010), este tipo tiene un alto contenido de sólidos que pueden variar del 14 a 16% (Bedolla *et al.*, 2003).

Yogur batido: la incubación y el enfriamiento se realizan en depósitos antes del envasado (Gil, 2010). El batido al que se somete el yogur debe hacerse a bajas velocidades, considerando que es un fluido tixotrópico (García-Garibay *et al.*, 1993).

Yogur líquido o bebible: la incubación y el enfriamiento se realizan de igual forma que en el batido, pero antes de su envasado es sometido a un proceso de homogenización (Gil, 2010).

1.1.2 Proceso de elaboración del yogur

El proceso general de elaboración de yogur del tipo bebible (Figura 1.1) se resume en la siguiente secuencia de operaciones: filtración, estandarización o

normalización, homogenización, tratamiento térmico, inoculación, incubación, enfriamiento.

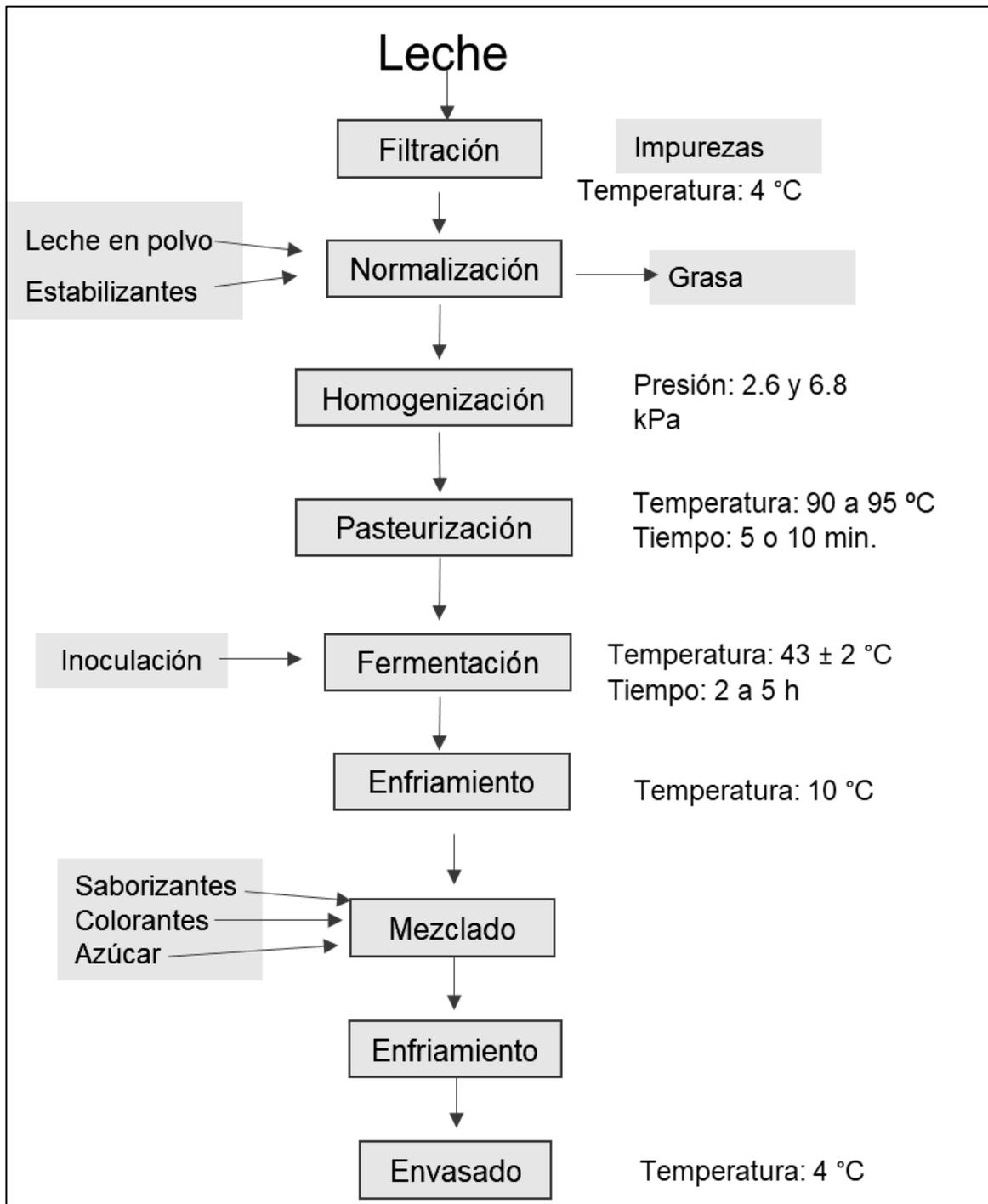


Figura 1.1 Diagrama de proceso para la elaboración de yogur bebible (adaptado de Gil, 2010).

Filtración. Este proceso se realiza para retirar partículas grandes (piedras, estiércol, etc.) que pueden estar presentes en la leche por el manejo en el establo y el transporte (Hernández, 2003).

Normalización o estandarización de la leche. La estandarización de la leche se realiza para garantizar un producto homogéneo por lo cual se ajusta el contenido de sólidos totales y de grasa (Gil, 2010), que no puede ser menor del 8.5%, en el caso de los sólidos, se suele añadir leche en polvo y para la grasa debe contener del 0.5 a 2% por lo cual se retira grasa de la leche (Romero-Castillo y Mestres-Lagarriga, 2004) ya que, la leche contiene entre un 2.5 y 6 % normalmente (Bylund y Gómez, 2003). Un contenido de sólidos bajo (11%) puede generar efectos negativos sobre la viscosidad y disminuir la fuerza del gel en el yogur lo que provoca la separación del suero de la leche (Hernández, 2003), además de que influye en el porcentaje de ácido láctico que se obtiene en la fermentación (Tamime y Robinson, 2007) .

Debido a que el yogur es un sistema multifásico (gel, suspensión y emulsión aceite en agua), donde la grasa tiene tendencia a separarse (McCarthy, 2011), los sólidos a sedimentarse y a presentar sinéresis (separación del suero), se recurre a la adición de estabilizantes mejorando la apariencia del yogur (Hernández, 2003) y contrarrestar los efectos negativos sobre la viscosidad y la fuerza del gel del bajo contenido de sólidos en la leche. Los estabilizantes más empleados son: almidón, carragenina, gretina, pectina, goma guar y goma algarrobo. Dichos aditivos estabilizan las proteínas que conforman la red tridimensional y retardan el movimiento del agua libre. Se agregan en esta etapa para evitar la agregación (Eskin y Shahidi, 2015).

Homogenización de la leche. La homogenización de la leche consiste en someter a la leche a altas presiones (entre 2.6 y 6.8 kPa) para lograr que la grasa esté distribuida de manera uniforme como se aprecia en la Figura 1.2, donde se trata de ejemplificar la separación de los agregados de grasa para impedir la separación de la crema durante el proceso de incubación (Gil, 2010; Tamime y Robinson, 2007).

Esta etapa es importante debido a que la leche es una emulsión y esto aumenta la estabilidad para que se evite la separación de la grasa y se disminuye el tamaño de las gotas de grasa. Por lo tanto, aumenta el número de las mismas disminuyendo la agregación, de esta forma se aumenta la dispersión y reflexión de la luz que como consecuencia producen que el color de la leche sea más blanco (Romero-Castillo y Mestres-Lagarriga, 2004).

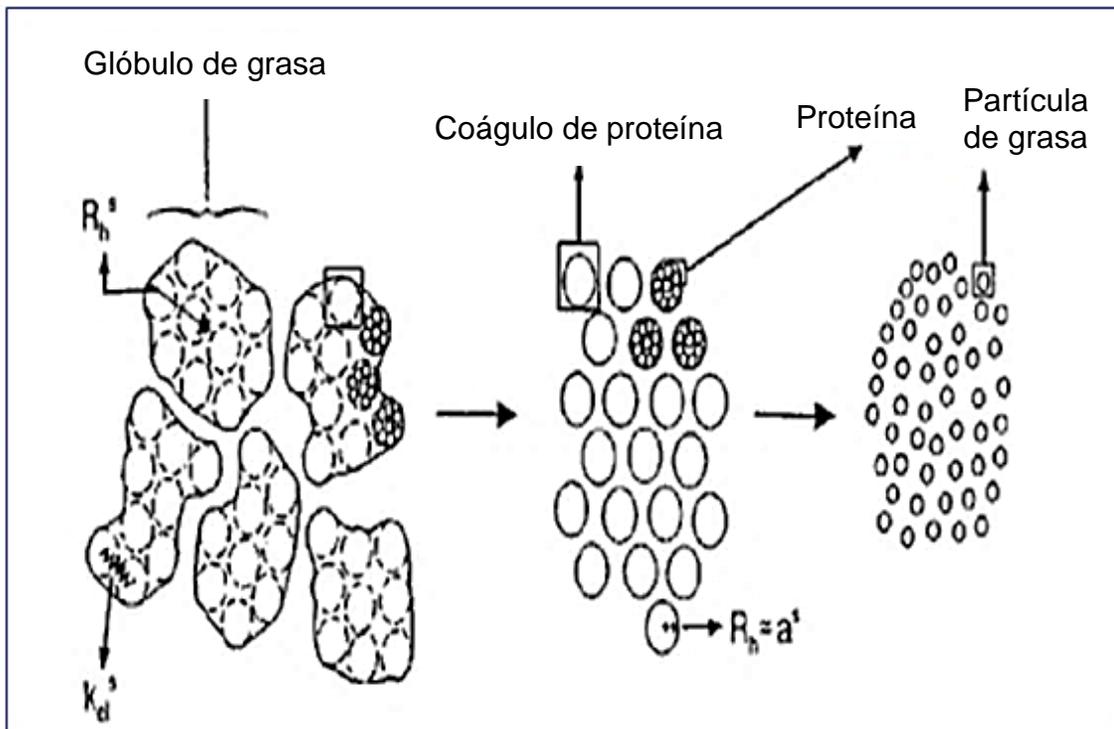


Figura 1.2 Efecto de la homogenización en la distribución de la grasa (Van Marle *et al.*, 1999).

Pasteurización. La pasteurización es un tratamiento térmico que se realiza para la destrucción de microorganismo patógenos e indeseables que pueden afectar en el proceso. Suelen emplearse temperaturas de 90 a 95 °C durante 5 o 10 minutos, este tratamiento también sirve para aumentar la estabilidad de los coágulos de grasa y para disminuir el riesgo de sinéresis durante el almacenamiento (Romero-Castillo y Mestres-Lagarriga, 2004).

Mediante el tratamiento térmico se propician condiciones necesarias para el crecimiento de los microorganismos (bacterias ácido lácticas), al reducirse la cantidad de oxígeno y al desnaturalizar las proteínas de la leche se liberan a los péptidos que contribuirán al crecimiento de los microorganismos, además la modificación de la estructura de las proteínas favorece su agregación lo cual mejora la capacidad de retención de agua e impide la separación del suero de la leche (Hernández, 2003), lo que ayuda a la formación de una red tridimensional entre las proteínas del suero y las caseínas que mejoran la viscosidad del producto final (Tamime y Robinson, 2007).

Inoculación. La leche homogenizada se enfría hasta la temperatura de incubación de 42 a 45 °C, donde se debe añadir el cultivo iniciador del 2 a 3 % con respecto al volumen de la leche, dicho cultivo puede estar compuesto de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus* en una relación del 1:1, para garantizar una adecuada consistencia, manteniendo la temperatura (Gil, 2010; Hernández, 2003). Actualmente suelen utilizarse cultivos disponibles en el mercado en forma liofilizada o congelada para agilizar el proceso (Romero-Castillo y Mestres-Lagarriga, 2004).

Fermentación. Es un proceso biológico que tiene lugar cuando los microorganismos inoculados usan la glucosa que contiene la leche para obtener su energía y de esta forma puedan producir metabolitos específicos como el ácido láctico, este proceso se lleva a cabo a una temperatura de 43 °C ± 2 °C en un biorreactor por un tiempo de 3 a 6 horas (Aguilar-Morales, 2012). El tiempo de fermentación depende de la capacidad de producción de ácido láctico por los microorganismos (Hernández, 2003).

La producción gradual de ácido láctico provoca la disminución del pH lo cual favorece la hidratación de las proteínas (Rivas y Velez, 2001) y cuando se obtiene un pH entre 4.6 y 3.7 se neutralizan las cargas negativas, lo cual conduce a la desnaturalización de las micelas de caseína, además los metabolitos producidos por las bacterias ácido lácticas (BAL) que inhiben el crecimiento de

microorganismos indeseables para el producto como la *Salmonella* y el *Staphylococcus aureus* (Andrade *et al.*, 2015).

En esta etapa del proceso se afecta el valor nutricional del yogur, ya que se ve influido por los efectos del procesamiento (condiciones del tratamiento térmico) los cuales determinan el contenido de vitaminas, minerales, grasa y proteínas (Early, 1998). Además se produce la modificación de la densidad, la consistencia, la viscosidad y se forman enlaces disulfuro entre la caseína y las proteínas del suero y se presentan interacciones caseína-caseína que conducen a una red tridimensional continua que retiene al agua y a los glóbulos de grasa (Tamime y Robinson, 2007).

Homogenización. En esta etapa las micelas de caseína y los glóbulos grasos, que forman la red tridimensional son parcialmente destruidos por las fuerzas de cizalla durante la homogeneización aplicada, haciendo más homogéneo y estable al yogur (Kok, 2010). Además, se adicionan los colorantes y concentrados de frutas o saborizantes (Tamime y Robinson, 2007).

Enfriamiento. El enfriamiento comienza inmediatamente después de alcanzar la acidez óptima de producto, es decir, a un pH de 4.6, hasta que se alcanza una temperatura alrededor de 10 °C lo más rápido posible, esto es con la finalidad de detener el crecimiento microbiano para posteriormente enfriar hasta temperaturas menores a los 6 °C (Tamime y Robinson, 2007).

1.2 Composición química del yogur bebible

La composición química del yogur varía en función de su formulación, las materias primas utilizadas (Early, 1998) y la concentración de los estabilizantes utilizados. Además, debido a la presencia de microorganismos en el proceso de elaboración, se modifican sus propiedades físicas y sensoriales como el sabor y el olor,

mejorándose también su calidad nutritiva (Ramírez *et al.*, 2011). En el Cuadro 1.1 se presenta el contenido nutrimental de diferentes yogures comerciales del tipo bebible sabor fresa.

La grasa en el yogur debe ser butírica (grasa de leche de vaca) y depende del tipo de leche utilizada en su elaboración que puede ser entera, parcialmente descremada o descremada (PROFECO, 2004). Además la materia grasa variará en función de las especies bacterianas utilizadas, debido a que las bacterias fermentadoras actúan sobre el componente graso de la leche produciendo derivados más fácilmente digeribles debido a que hidrolizan una pequeña porción de la grasa, produciendo ácidos grasos libres, que aumentan con respecto a la leche utilizada para su elaboración, aunque el perfil graso total no varía mucho (Arazazu-Montero *et al.*, 2007).

Cuadro 1.1 Contenido nutrimental de yogur comercial sabor fresa (PROFECO, 2017).

Valores cada 100 mL	Danone Danup	Lala
Grasa (%)	1.6	1.6
Proteínas (%)	1.6	2
Carbohidratos (%)	14.1	12.9
Energía (kJ)	323	310

Los carbohidratos están formados principalmente por la lactosa (azúcar de la leche) que se encuentra en el producto entre un 4 a 5% (Early, 1998); de esta manera la grasa y los carbohidratos son importantes fuentes de energía nutritivamente, estos componentes proporcionan el 89% de las calorías que requiere un adulto al día (Vasseur, 1960).

El valor proteínico de las leches fermentadas es similar al de la leche utilizada para su elaboración, la diferencia entre ambos alimentos radica en la mejor digestibilidad de las proteínas en las leches fermentadas debido a las enzimas proteolíticas de los microorganismos que hidrolizan parcialmente las proteínas (Arazazu-Montero *et al.*, 2007), por esto, el valor nutricional aumenta respecto a la leche. Además, las proteínas lácteas modifican algunas características del yogur lo que contribuye a la calidad del producto, ya que determinan en gran medida la estructura y estabilidad de este (Badui, 2006; Bylund y Gómez, 2003).

1.3 Beneficios del consumo de yogur

El yogur es considerado como un alimento funcional, ya que proporciona diferentes beneficios para la salud del consumidor (Cámpora, 2016). Los productos lácteos fermentados son alimentos a los cuales es sencillo incorporar: proteínas y péptidos bioactivos, probióticos y prebióticos, vitaminas (A, D y E) y minerales, debido a sus características físico-químicas (Gutiérrez *et al.*, 2017).

Las bacterias ácido lácticas (BAL) juegan un papel importante en la determinación de los efectos positivos para la salud de los productos lácteos fermentados, ya que son los habitantes naturales del tracto gastrointestinal (Shiby y Mishra, 2013), además de que en el yogur se ha detectado la presencia de péptidos a los cuales se les atribuyen efectos positivos en el sistema inmune, la prevención de cáncer y disminuyen los niveles de colesterol (Granato *et al.*, 2010).

Debido a que el yogur contiene probióticos, principalmente *Lactobacillus*, durante la fermentación utilizan la lactosa como fuente de energía, generando que su contenido se reduzca (Hernández, 2003), por lo tanto, facilita la digestión de la lactosa residual por intestino delgado, lo cual proporciona una opción para las personas intolerantes a la lactosa (Huertas-Parra, 2012).

Por otro lado, varios estudios han reportado que el consumo de yogur que contiene bacterias probióticas inhibe la formación y proliferación de tumores. Se sugiere que las leches fermentadas suprimen el comienzo de carcinogénesis (Huertas-Parra, 2012). Además, es importante resaltar que es una abundante fuente natural de calcio, puede llegar a cubrir el 70% del requerimiento diario por lo que es ideal para prevenir y mejorar la osteoporosis (Cámpora, 2016).

1.4 Reología del yogur bebible

Las propiedades reológicas de los alimentos fluidos como la leche y las bebidas lácteas fermentadas son importantes en el transporte por bombeo en diversas operaciones durante el procesamiento, y necesarias para determinar la potencia, así como, pueden ser útiles para mejorar y optimizar procesos térmicos. Además, las propiedades se relacionan con la calidad y aceptación del producto por los consumidores (Steffe, 1996; Liu *et al.*, 2017).

La ciencia encargada de estudiar las propiedades de flujo y la deformación de los materiales es la reología (Gallego *et al.*, 2012), dentro de la cual existen variables que son pieza fundamental en el entendimiento e interpretación de la reología, dichas variables son esfuerzo, deformación, velocidad de deformación y el tiempo de aplicación.

Las propiedades reológicas del yogur, al ser un alimento de naturaleza compleja debido a su estructura interna (Gallego *et al.*, 2012), dependen de la composición de la muestra, del proceso de obtención y de las condiciones de almacenamiento. También dependen de las condiciones de prueba como son: la preparación de la muestra, el tiempo de aplicación y la velocidad de cizallamiento que se aplique (McClements, 2010; Mott, 1996; Steffe, 1996).

El yogur es un material semisólido o semilíquido que presenta un comportamiento viscoelástico, ya que exhibe tanto características de sólido como de fluido. En pruebas reológicas, estáticas o dinámicas, donde al someter al material a condiciones de baja deformación o a la aplicación de un esfuerzo de cizalla pequeño, su estructura interna sufre cambios mínimos, lo cual se debe a que demoran un tiempo para llevar a cabo los reordenamientos estructurales. Cuando es sometido a condiciones de flujo, exhibe propiedades reológicas que van desde un material tixotrópico y fluidificante, ya que la consistencia se altera de manera abrupta debido a una modificación drástica de la estructura, lo cual se puede describir en términos del fenómeno de transición gel-sol. Al cesar el flujo, el material se reestructura lentamente (Ancey, 2005; Rao, 1999; Steffe, 1996).

En diferentes estudios realizados en yogur batido, se han reportado los modelos de Ostwald de Waele o función potencia (Ec. 1), y el modelo Herschel-Bulkley (Ec. 2) en las curvas de flujo obtenidas, cuando se incrementa la velocidad de cizalla, sin embargo, no se considera el efecto del tiempo de cizallamiento, ya que la curva de descenso de velocidad de cizalla no coincide. En estudios de medida de viscosidad a velocidad de cizalla constante, la ecuación de Weltman (Ec. 3) es la más utilizada para expresar la tixotropía (Rivas y Velez, 2001).

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n + \sigma_0 \quad (2)$$

$$\eta = A - B \log(t) \quad (3)$$

Donde K es el índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n , es el índice de comportamiento de flujo, σ_0 es el esfuerzo de cedencia (Pa), el parámetro A representa la resistencia al flujo ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), mientras que el parámetro B mide el daño estructural (s^{-1}), t el tiempo de aplicación (s) y η es la viscosidad ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

El modelo de Ostwald-de Waele fue utilizado por Aportela-Palacios *et al.* (2005) en el estudio de la influencia de la composición en las propiedades de flujo de yogur batido fortificado con calcio y fibra. Se utilizó un viscosímetro Brookfield modelo LVT en un intervalo de 0 a 100 rpm y de 100 a 0 rpm a 25°C, donde la viscosidad y la velocidad de cizalla fueron calculadas por medio de los valores de velocidad de rotación y la constante de torsión, aplicado las constantes dadas por el fabricante para el husillo LV-4. Solamente se analizó la curva de flujo obtenida con el ascenso de la velocidad de rotación. Todas las muestras presentaron un comportamiento fluidificante a la cizalla, ya que la relación de la viscosidad en función de la velocidad de rotación disminuyó. Se concluyó que la presencia de salvado de trigo como fuente de fibra favoreció la viscosidad de los sistemas fortificados, que se incrementó en función del aumento del porcentaje de fibra.

En otra investigación, estudiaron la influencia de la adición de pectina y concentrado de fresa, en la dependencia del tiempo de cizallamiento en el yogur. Las mediciones reológicas se realizaron en un viscosímetro rotacional Haake RV20, donde se sometieron las muestras de 0 a 300 1/s en 3 minutos, posteriormente se mantuvo la velocidad de cizallamiento de 300 1/s durante 10 minutos y luego disminuyó la velocidad de cizalla en los siguientes 3 min. Los resultados de las curvas de flujo, ascenso y descenso de la velocidad de cizalla se ajustaron al modelo de Herschel-Bulkley (Basak y Ramaswamy, 1994).

El esfuerzo de cedencia se obtuvo del ajuste de los resultados de la curva de ascenso de la velocidad de cizalla, el cual aumenta con el contenido de sólidos, sin embargo, este valor hay que tomarlo con precaución, ya que está relacionado tanto a la sensibilidad y precisión del viscosímetro o reómetro, así como a las condiciones de medición, por lo que a este parámetro no se le puede asignar un valor único (Rúa y Aguilera, 2005).

El modelo de Weltman fue utilizado para considerar el efecto del tiempo de cizallamiento en los datos obtenidos para el segmento en el que se aplicó una

velocidad de cizalla constante durante 10 min. En este caso el parámetro A representa la resistencia al flujo, mientras que el parámetro B mide el daño estructural (Basak y Ramaswamy, 1994). Se concluyó que todas las muestras de yogur presentaron un comportamiento tixotrópico y que la pectina y el concentrado de fresa tuvieron un efecto considerable en el parámetro A .

Lui *et al.* (2017) evaluaron las características reológicas y físicas del yogur bajo en grasa preparado con cepas tradicionales y un mutante de *Lactobacillus selbrueckii* subespecie *bulgaricus*, para el estudio se aplicaron pruebas dinámicas en las cuales la muestra se deformó al 5% y se realizó un barrido de frecuencia de 0.1 a 10 Hz. Se calcularon los módulos de almacenamiento y pérdida en función de la frecuencia. Se observó una disminución del módulo de almacenamiento (G') al disminuir la temperatura de fermentación de 42 °C a 30-37 °C. El tiempo de almacenamiento tuvo un efecto directo en los módulos, ya que las muestras que tenían más tiempo de almacenamiento (21 días) y contenían al mutante presentaron mayores valores en el módulo de almacenamiento.

Además, se realizó una curva de flujo ascenso-descenso de la velocidad de cizalla de 1 a 100 s^{-1} a 25 °C. En condiciones de flujo se observó un comportamiento tixotrópico y calcularon el área entre las dos curvas de flujo. Además, la microestructura del yogur observada en el microscopio se caracterizó por presentar agregados de proteínas y poros grandes.

1.5 Evaluación del comportamiento reológico

El comportamiento reológico de un material se puede evaluar por medio de métodos fundamentales del que se obtienen las funciones materiales, las cuales sólo dependen del material y no del método, ni del instrumento (Barnes, *et al.*, 1989). Las pruebas que comúnmente se emplean para su caracterización reológica están

basadas en medidas bajo cizalla estacionaria (rotacional y oscilatoria) (McClements, 2010).

1.5.1 Comportamiento al flujo

El comportamiento al flujo de un material se puede evaluar mediante el uso de reómetros y viscosímetros, donde básicamente se miden los parámetros reológicos y se relaciona la naturaleza del producto con su modelo reológico (Rao, 1999). Con base a dicho comportamiento los fluidos se clasifican en dependientes del tiempo de cizallamiento (tixotrópico y antitixotrópico) e independientes del tiempo de cizallamiento (newtonianos y no newtonianos), por lo cual hay que tomar en cuenta que el yogur es un fluido no newtoniano, fluidificante y presenta dependencia del tiempo de cizallamiento (tixotrópico).

Para una mejor comprensión del comportamiento al flujo se representan dos tipos de gráficos, la “curva de flujo” y la “curva de viscosidad”. En la curva de flujo (Figura 1.3) se grafica el esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de baja deformación cizalla denominada comúnmente velocidad de cizalla, mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de cizalla, donde para el caso de los fluidos no newtonianos la viscosidad no permanece constante (Steffe, 1996).

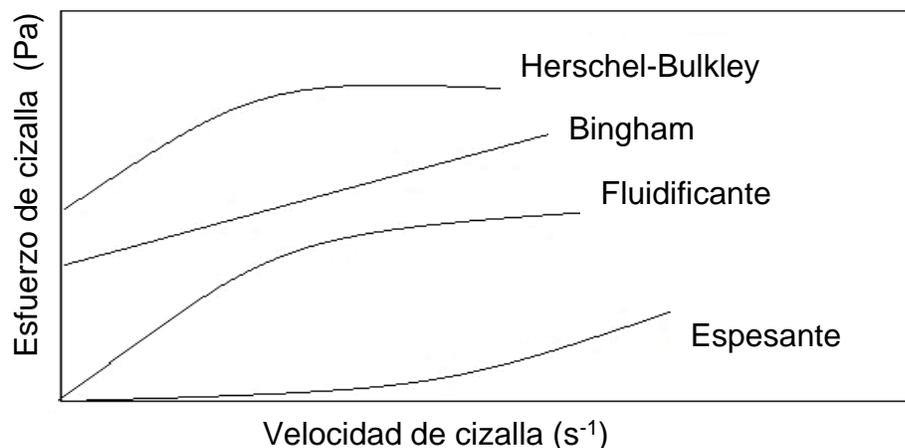


Figura 1.3 Curva de flujo para fluidos no-newtonianos (Steffe, 1996).

Los materiales fluidificantes se adelgazan cuando se someten la velocidad de cizalla y la ecuación constitutiva que describe estos comportamientos es una función tipo potencia o modelo de Ostwald-de Waele (Ec. 1). Los parámetros característicos de este modelo es K y n (Rao, 1999; Steffe, 1996).

Los fluidos plásticos se comportan como sólidos antes de fluir o antes de sobrepasar un esfuerzo de cedencia, y como fluido después de sobrepasarlo. Estos fluidos pueden tener una estructura tridimensional, por lo que se requiere de un esfuerzo de cedencia para romper parcialmente la estructura e iniciar el flujo, una vez alcanzadas las condiciones de flujo se comporta como un material fluidificante (McClements, 2010; Steffe, 1996). Como es el caso del modelo de Herschel-Bulkley (Ec. 2) donde los parámetros característicos son el índice de consistencia, el índice de comportamiento de flujo y el esfuerzo de cedencia. El modelo de Bingham (Ec. 4) describe el comportamiento de un fluido en el cual una vez que supera el esfuerzo de cedencia el fluido comienza a fluir y se comporta como un fluido newtoniano, donde σ_0 es el esfuerzo de cedencia y η_p es la viscosidad plástica.

$$\sigma = \sigma_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (4)$$

Una forma de forma de comprobar si un fluido es tixotrópico, es por medio de un ciclo de cizallamiento donde al aplicar una velocidad de cizalla ascendente y descendente a un material (Figura 1.4), se podrá observar que la representación gráfica es similar a la de un material fluidificante donde la viscosidad va disminuyendo al aplicar el cizallamiento, por la disminución de las pendientes, esto se debe a que se rompe la estructura interna del material (Ancy, 2005), sin embargo una vez que la velocidad de cizalla disminuye, la viscosidad aumenta debido a la reconstrucción de su estructura aunque está se retarda en comparación con la velocidad de cizalla y el tiempo de aplicación (Bedolla *et al.*, 2003).

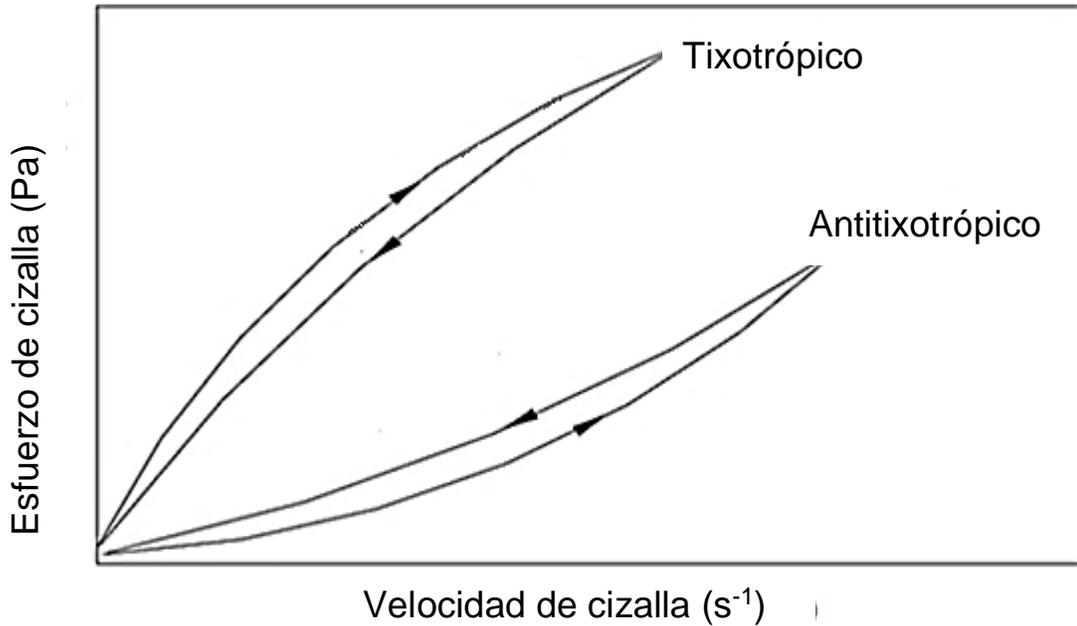


Figura 1.4 Comportamiento de fluidos tixotrópicos (Rao, 1999).

Otra forma de evidenciar la tixotropía es aplicando pruebas a velocidad de cizalla constante donde el adelgazamiento se puede describir mediante un gráfico de esfuerzo de cizalla o viscosidad en función del tiempo de cizallamiento (Figura 1.5), en el cual la pendiente inicialmente será pronunciada y luego disminuye con el tiempo a un valor constante que no es cero (McCarthy, 2011).

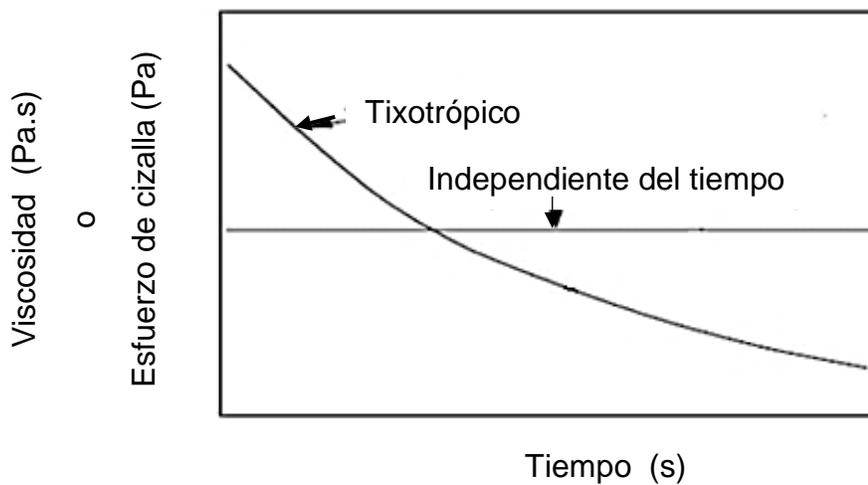


Figura 1.5 Comportamiento de fluidos tixotrópicos a velocidad de cizalla constante (Steffe, 1996).

1.5.2 Comportamiento viscoelástico

El comportamiento viscoelástico de un material se puede evaluar por medio de dos métodos: transitorios o estáticos y los métodos dinámicos (Steffe, 1996).

Los métodos se basan en la aplicación de un esfuerzo o deformación que no generen pruebas donde se destruya la muestra, por lo cual las pruebas se pueden realizar dentro de dos zonas la lineal y la no lineal. La zona de viscoelasticidad lineal donde el material depende sólo del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo que se aplica, mientras en la zona no lineal las propiedades mecánicas dependen del tiempo y la magnitud del esfuerzo aplicado o la deformación aplicada (Rao, 1999).

Pruebas estáticas: En las pruebas transitorias o estáticas se aplica un esfuerzo o una deformación constante. Las dos pruebas transitorias típicas de viscoelasticidad que son relajación de esfuerzos y fluencia. La prueba de fluencia consiste en someter al material a un esfuerzo constante pequeño y medir el aumento de la deformación con respecto al tiempo, mientras que la prueba de relajación consiste en aplicar una deformación constante y medir el esfuerzo requerido para mantener el material en esa condición (Steffe, 1996).

Pruebas dinámicas: En las pruebas dinámicas o de cizalla oscilatoria las muestras están sujetas a un movimiento oscilatorio generalmente a través de un cono y placa o una placa fija. Típicamente, se aplica una deformación en forma sinusoidal a la muestra midiendo un esfuerzo para ser transmitido a través del material, aunque sólo se pueden aplicar cuando la deformación generada en la muestra no excedan el intervalo de la zona de viscoelasticidad lineal, los cuales harían una recuperación sea imposible (Cuello, *et al.*, 2014).

La magnitud y el desfase de tiempo de la transmisión del movimiento oscilatorio depende de la naturaleza viscoelástica de la sustancia de prueba. Investigar este tipo de fenómenos conduce a la definición de varias funciones materiales que

relacionan: la viscosidad compleja (η^*), la viscosidad dinámica (η'), el módulo complejo (G^*), el módulo de pérdida (G'') y el módulo de almacenamiento (G') su relación (G''/G') conocida como ángulo de pérdida (Steffe, 1996).

Si la muestra es sometida a una deformación (γ) que varía de forma sinusoidal en función del tiempo ésta queda definida por la Ec. 5:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{ sen } \omega t \quad (5)$$

Donde γ_0 es la amplitud máxima de la deformación y ω es la frecuencia.

Mientras que el esfuerzo varía con la misma frecuencia ω , pero presentando un desfase δ con respecto a la deformación puede ser representado por:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{ sen } (\omega t + \delta) \quad (6)$$

Donde σ_0 es la amplitud del esfuerzo y δ es el ángulo de desfasamiento (también llamado el ángulo de pérdida mecánica), este último provee información útil sobre las propiedades viscoelásticas: $\delta = 0^\circ$ para un sólido puramente elástico, $\delta = 90^\circ$ para un sólido puramente viscoso (Steffe, 1996). Para un material viscoelástico el esfuerzo resultante se expresa en términos del módulo de almacenamiento G' y del módulo de pérdida G'' como se muestra en la Ec. 7.

$$\sigma(t) = \gamma_0 [G'(\omega) \text{ sen } \omega t + G''(\omega) \text{ cos } \omega t] \quad (7)$$

De esta manera las expresiones que definen el comportamiento viscoelástico son las siguientes:

$$G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \quad (8)$$

$$G^* = (G'^2 + G''^2) \quad (9)$$

$$G' = G^* \cos \delta \quad (10)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (11)$$

Donde el módulo complejo (G^*) es una medida de la resistencia que presenta el material a la deformación.

Por lo tanto, el módulo de almacenamiento (G') descrito por la Ec. 10 es una medida de la energía almacenada y recuperada por el material durante el ciclo de cizallamiento, es un indicador del componente elástico del material. Mientras que el módulo de pérdida (G'') descrito por la Ec. 11 es una medida de la energía disipada como calor por el material, es un indicador del componente viscoso, en el cual ambos módulos son funciones de la frecuencia aplicada.

La magnitud de los módulos permite establecer qué tipo de comportamiento que predomina en un material viscoelástico, ya sea un sólido o como un líquido. Si G' es mayor que G'' el material se comportará como un sólido, para explicar este comportamiento se debe hacer un gráfico de G' y G'' en función de la frecuencia angular, en la cual la deformación será esencialmente elástica o recuperable. Sin embargo, si G'' es mayor que G' la energía usada para deformar el material es disipada y el material se comportará como un líquido (Cuello *et al.*, 2014).

El cociente entre estas funciones se define la tangente del ángulo de desfase o tangente de pérdida (Ec. 12), y es una medida de la razón de la energía almacenada y disipada en un ciclo de deformación, la cual también está en función de la frecuencia.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (12)$$

En forma alternativa el módulo complejo puede definir a la viscosidad dinámica como:

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} \quad (13)$$

Donde η^* es la viscosidad dinámica y ω es la frecuencia.

Mientras que el yogur al ser un material viscoelástico presenta a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas, esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia de una red elástica tridimensional que tiende a degradarse, donde mientras más fácil se rompa su estructura, mayor será su comportamiento viscoso (Steffe, 1996; McClements, 1999). Los fluidos de esta naturaleza exhiben una recuperación de su estructura durante el flujo, es decir muestran propiedades tanto viscosas como elásticas, donde parte de la estructura se recupera al eliminar el esfuerzo aplicado (Geankoplis, 1998).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

Objetivo general

Evaluar las propiedades reológicas de diferentes yogures bebibles comerciales mediante pruebas de cizalla oscilatoria y rotacional, considerando para su análisis las propiedades fisicoquímicas y la composición química reportada por el proveedor, realizando una comparación que permita definir cuál es el método de caracterización reológica más adecuado dependiendo de lo que se quiera analizar.

Objetivos particulares

1. Determinar el pH, índice de refracción y densidad de los yogures comerciales como parámetros de control para el análisis de la influencia que tienen en las propiedades reológicas.
2. Determinar la evolución de los módulos de almacenamiento y de pérdida en función de la frecuencia de diferentes yogures bebibles comerciales a partir de la prueba de cizalla oscilatoria cuantificando su comportamiento viscoelástico.
3. Determinar el comportamiento al flujo de diferentes yogures bebibles comerciales mediante la aplicación de cizalla rotacional bajo diferentes condiciones de cizallamiento para la cuantificación del esfuerzo de cedencia, dependencia con el tiempo de cizallamiento y los parámetros de flujo.

2.2 Materiales

Se utilizaron yogures bebibles comerciales de 4 marcas conocidas de sabor fresa (sin partículas visibles), los cuales fueron obtenidos en el mercado local adquiriendo todas las muestras del mismo lote, las cuales se mantuvieron en refrigeración (5 °C). La composición de cada yogur bebible se muestra a continuación:

- Yogur Danup (YB1, Danone de México) que contiene de acuerdo con su etiqueta almidón modificado, aceite vegetal, 3.5% de preparado de fruta, xantana, además de un 1.6% de grasa y un 1.7% de proteína.
- Yogur Yoplait (YB2, Yoplait de México) contiene 4.5% de preparado de fruta, almidón modificado, pectina, sorbato de potasio (conservador), 1.6% de grasa y 1.6% de proteínas.
- Yogur Lala (YB3, Lala de México) contiene 10% de preparado de fruta, sorbato de potasio, almidón modificado, pectina, grenetina, 1.6% de grasa y 1.8 de proteína.
- Yogur Activia (YB4, Danone de México) de acuerdo con su etiqueta contiene 9% de preparado de fruta, almidón modificado, sorbato de potasio, xantana, algarrobo, 1.5% de grasa y 2.3% de proteína.

La muestra de YB4 contiene el mayor porcentaje de proteína (2.3%) en su formulación en comparación con las demás muestras, sin embargo, también tiene un contenido de grasa ligeramente menor (1.5%). Por otro lado, YB3 presenta mayor contenido de preparado de fruta (10%). Todas las muestras reportan polisacáridos espesantes o gelificantes adicionados (almidón modificado, pectina, algarrobo y xantana).

Las muestras de los diferentes yogures bebibles comerciales (YB1, YB2, YB3 y YB4) se agitaron ligeramente (15 veces de izquierda a derecha) y se colocaron directamente del envase en la geometría del reómetro. En el caso de las propiedades fisicoquímicas y la densidad se retiraron las muestras de refrigeración y se atemperaron a 25 °C antes de hacer la medición.

2.3 Métodos

2.3.1 Determinación de propiedades fisicoquímicas

- **Índice de refracción**

La medición del índice de refracción se realizó colocando una gota de muestra sobre el lente del refractómetro digital modelo 300034 (Sper Scientific, USA). El instrumento determina el índice de refracción (nD) y los grados Brix por medio la velocidad de propagación que hay en un medio, para lo cual hace uso del principio de refracción total de la luz, el cual tiene lugar en la capa límite entre el prisma y la muestra donde el índice de refracción del prisma determina el límite superior del intervalo de medición, ya que éste debe ser siempre mayor que el de la muestra (Osorio, 2009).

- **Medición de pH**

La medición del pH de los diferentes yogures bebibles comerciales se realizó a temperatura ambiente en un potenciómetro modelo H700 (Oakton, China), que mide la diferencia de potencial de iones hidrógeno (H^+) entre dos electrodos como una diferencia de potencial eléctrico entre ellos, uno colocado del lado interno de la membrana y el otro del lado externo en contacto con la solución cuyo pH se desea determinar (Aldabe y Aramendia, 2007). La diferencia de potencial es indicada con valores de pH en la pantalla del potenciómetro, para lo cual antes de efectuar la

medición de pH se verificó el electrodo con dos soluciones amortiguadoras de pH 7 y de 4 para posteriormente realizar la medición con la muestra.

2.3.2 Determinación de densidad

Para determinar la densidad de la muestra se utilizó el método de picnometría, que se basa en la relación de la masa de la muestra entre la masa del fluido de referencia en un volumen constante. La determinación de la densidad se realizó por medio un picnómetro a peso constante, para lo cual se pesaron los picnómetros con y sin la muestra, o con agua (Ec. 14), se compararon sus masas para obtener la densidad relativa (Burns *et al.*, 2003).

$$\rho_{rel} = \frac{M1 - M2}{M3 - M2} \quad (14)$$

Donde:

ρ_{rel} : Densidad relativa

$M1$: Masa del picnómetro con el yogur (g)

$M2$: Masa del picnómetro vacío (g)

$M3$: Masa del picnómetro con agua (g)

2.3.3 Estudio reológico bajo cizalla oscilatoria

Para la realización de la prueba se utilizó un reómetro MCR 301 (Anton Paar, Austria) con una geometría de cono CP75-1 (diámetro 75 mm) y un ángulo de un grado, dejando un espacio de 0.15 mm. Primero para determinar la zona viscoelástica lineal se varió la deformación de 0.05 a 0.5%, manteniendo una velocidad angular constante de 10 rad/s. Segundo, se realizó un barrido de la frecuencia angular en un intervalo de 0.1 a 200 rad/s a una deformación constante de 0.1 % correspondiente dentro de la zona viscoelástica lineal con 20 puntos.

La prueba se efectuó por triplicado a 5 °C, para determinar la zona viscoelástica lineal en la cual los módulos no dependen de la deformación aplicada (Steffe, 1996), se graficó G' y G'' en función de la deformación como se muestra en la Figura 2.1. Mientras que para determinar el comportamiento viscoelástico se graficó G' y G'' en función de la frecuencia angular.

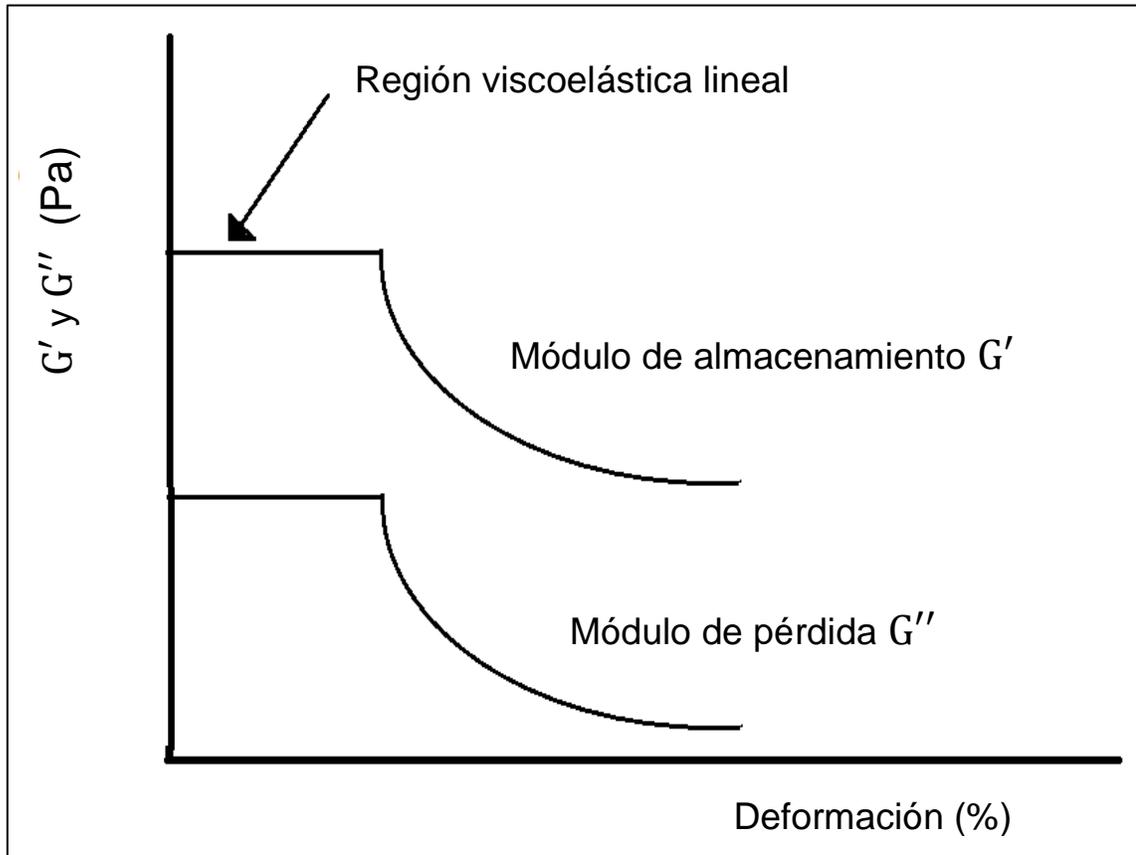


Figura 2.1 Región viscoelástica lineal en un barrido de deformación (Steffe, 1996).

2.3.4 Determinación del comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional

La determinación del comportamiento al flujo también se realizó en el reómetro MCR 301 (CP75-1). La medición en el reómetro consiste en la transferencia de cantidad de movimiento desde el cono que rota hacia la placa en que está contenida la

muestra (Martínez-Padilla, 2012). Se mide el torque del motor requerido para mover el cono y se transforma en esfuerzo de cizalla (multiplicado por una constante) y la velocidad de rotación se transforma en la velocidad de cizalla con la constante de proporcionalidad respectiva, que también depende de las dimensiones del cono que rota utilizado. La viscosidad se calculó a través del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla (Steffe, 1996). El estudio del comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional incluyó la determinación del esfuerzo de cedencia, determinación de la dependencia con el tiempo de cizallamiento y la determinación de la curva de flujo.

2.3.4.1 Esfuerzo de cedencia

Para determinar el esfuerzo que se requiere para hacer fluir la muestra también denominado esfuerzo de cedencia se aplicó un barrido de esfuerzos de cizalla en un intervalo de 0.1 a 5 Pa con 50 puntos, registrando la deformación y la velocidad de cizalla un punto cada 10 s a 5 °C. El hecho de que la prueba se realizó a 5 °C ya que el valor del esfuerzo de cedencia, es más evidente a bajas temperaturas debido a que hay menor movilidad de las moléculas provocando que la estructura se encuentre unida por enlaces débiles (Badui, 2006).

Para definir el valor del esfuerzo de cedencia se utilizaron dos métodos estáticos denominados método A y método B. En el método B se aplicó un esfuerzo de cizalla pequeño de forma ascendente y se registró la deformación de cizalla y/ o la velocidad de cizalla generadas.

En el método A se trazó un gráfico de la deformación de cizalla en función del esfuerzo de cizalla. El intercepto de la zona lineal y no lineal marcado con una línea recta al inicio de la curva y otra línea recta al final de la misma, define el esfuerzo de cedencia, como se muestra en la Figura 2.2 (Steffe, 1996).

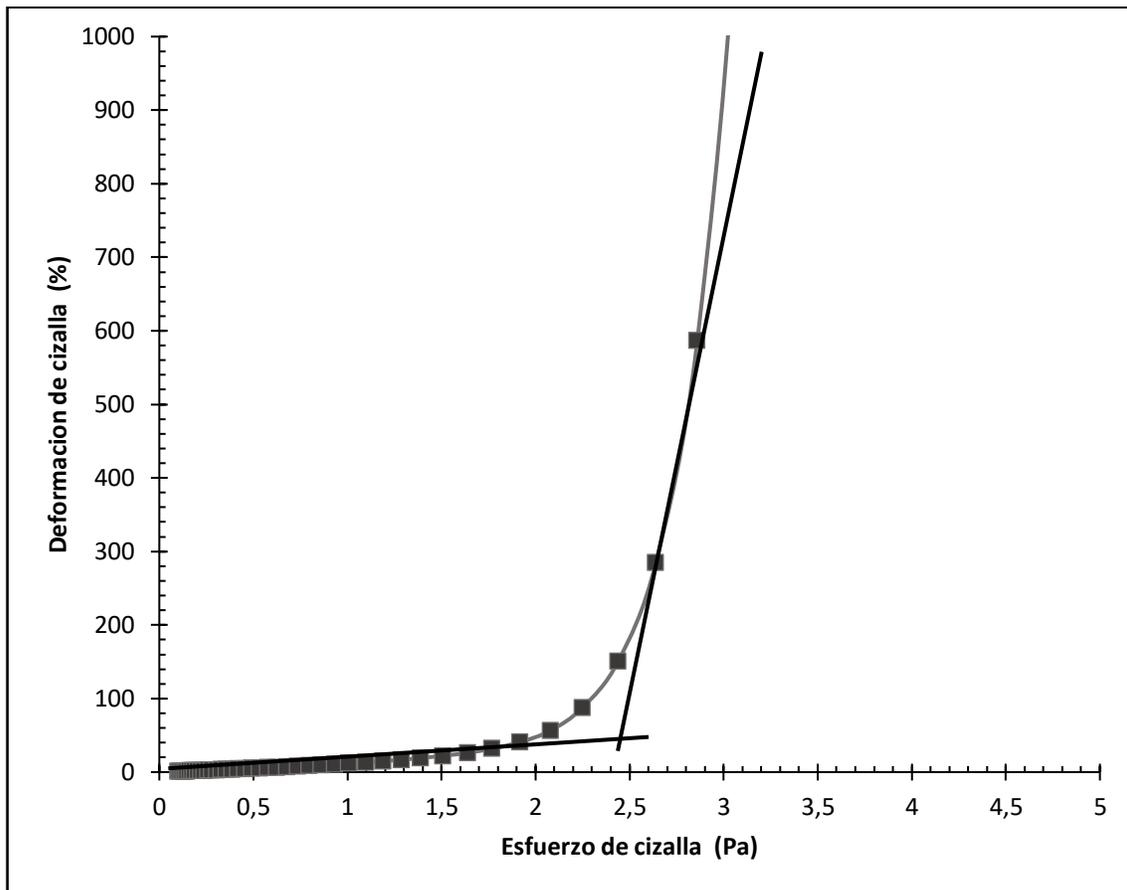


Figura 2.2 Deformación en función del esfuerzo de cizalla.

En el método B, el esfuerzo de cedencia se obtuvo del gráfico del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla (curva de flujo) y se extrapola el esfuerzo de cizalla cuando la velocidad de cizalla es superior a 0.1 s^{-1} , como se muestra en la Figura 2.3.

El valor de velocidad de cizalla es seleccionado arbitrariamente ($0.1, 1, 10 \text{ s}^{-1}$) y en este caso se seleccionó 0.1 s^{-1} , ya que el punto de inflexión del esfuerzo era más cercano a ese valor, además de que se obtuvieron resultados similares a los del método A.

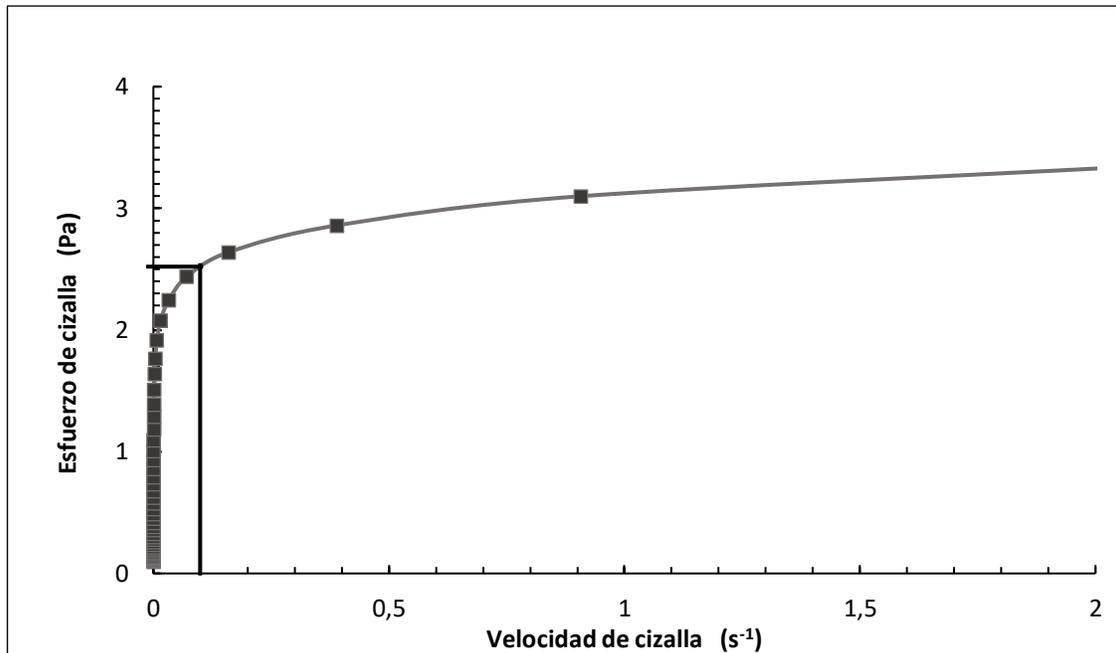


Figura 2.3 Curva de flujo a bajas velocidades de cizalla.

2.3.4.2 Dependencia del tiempo de cizallamiento.

La determinación de la dependencia del tiempo de cizallamiento se realizó a 5 °C aplicando una velocidad de cizalla constante durante 400 s, a 4 diferentes velocidades de cizalla (1, 10, 100, y 1000 s⁻¹) de forma subsecuente en la misma muestra con 20 puntos y 20 s en cada punto. Se graficó la viscosidad en función del tiempo de cizallamiento. Se realizó una regresión logarítmica a los datos obtenidos a cada velocidad para analizar la dependencia con el tiempo de cizallamiento y así obtener los parámetros A y B del modelo de Weltman (Ec. 3), donde el parámetro A representa la resistencia al flujo mientras que el parámetro B mide la velocidad en la que ocurre el daño estructural.

2.3.4.3 Curva de flujo

La determinación de la curva de flujo se realizó en tres etapas un ascenso-mantenimiento-descenso de la velocidad de cizalla, donde en la primera etapa se

aplicó de 1 a 1000 s⁻¹, en la segunda etapa se mantuvo la velocidad de 1000 s⁻¹ y por último se aplicó un descenso de 1000 a 1 s⁻¹ con 25 puntos en cada etapa donde la lectura de esfuerzo de cizalla se registró cada 10 s. La prueba se aplicó a 5 °C, y se realizó el gráfico de esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla para ajustar los datos experimentales a un modelo reológico para cada segmento de la curva por separado.

2.3.5 Análisis estadístico

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, por lo que se determinó medidas de tendencia central (promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación en porcentaje) para conocer la desviación de los datos con respecto al promedio. Además, se aplicó un análisis de varianza utilizando un programa estadístico comercial (MINITAB 17) y una prueba de Tukey para determinar diferencias significativas entre las medias de los resultados empleando un nivel de confianza de 95%.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propiedades fisicoquímicas de diferentes yogures bebibles comerciales

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas como el índice de refracción y el pH como parámetros de control. En el Cuadro 3.1 se muestran los valores promedio obtenidos para los diferentes yogures comerciales donde cada uno tuvo un coeficiente de variación menor al 1%, lo cual indica que las mediciones fueron repetibles.

Cuadro 3.1 Propiedades fisicoquímicas de diferentes yogures bebibles comerciales a 25 °C.

Muestra	Índice de refracción	pH
YB1	1.3507 ^a ± 0.0004	3.45 ^a ± 0.01
YB2	1.3528 ^b ± 0.0004	3.68 ^b ± 0.01
YB3	1.3542 ^c ± 0.0004	3.88 ^c ± 0.01
YB4	1.3545 ^d ± 0.0004	4.03 ^d ± 0.02

Valores con la misma letra en cada columna indica que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05$ ± Desviación estándar).

En los valores del índice de refracción (1.3507 – 1.3545) se puede observar que hay un aumento con respecto a los valores de la leche (1.3440), lo cual puede deberse a la cantidad de sólidos agregados durante la estandarización de la leche, además

de los edulcorantes adicionados y los azúcares restantes después de la fermentación (Tamime y Robinson, 2007). Las diferencias significativas observadas entre todas las muestras, es debido a los sólidos solubles que pueden estar en diferentes proporciones.

Por otro lado, debido al proceso de fermentación que ocurre en la obtención del yogur, se midió el pH, el cual depende de la capacidad de producción de ácido láctico por los microorganismos empleados, lo que produce su disminución (Hernández, 2003). La fermentación generalmente se detiene en valores inferiores a 4.5 (Tamime y Robinson, 2007). Todas las muestras se encontraron en un intervalo de 3.45 a 4.03, siendo la muestra YB4 la que tuvo el mayor valor, sin embargo, todos los yogures son estadísticamente diferentes entre sí. Es importante que los valores se encuentren debajo de lo establecido, ya que influye directamente en las proteínas que conforman la red tridimensional (Andrade *et al.*, 2015). Las diferencias significativas de pH encontradas entre las propiedades fisicoquímicas se pueden deber a la formulación de cada fabricante y al proceso aplicado.

3.1 Densidad de diferentes yogures bebibles comerciales

Se determinó la densidad como otro parámetro de control. En el Cuadro 3.2 se muestran los valores promedio de la densidad relativa obtenidos para los diferentes yogures bebibles comerciales, en el cual se puede apreciar que hay poca diferencia (menor al 2 %) entre los yogures, y que los valores están dentro de un intervalo de 1.0817 – 1.1096 , lo cual se debe a la variación que presentan conforme a su formulación, ya que entre mayor cantidad de sólidos contenga el yogur en su formulación mayor será el valor de la densidad. Las muestras YB3 y YB4 al tener un mayor índice de refracción implica que contienen mayor contenido de sólidos solubles por lo que es congruente que presenten mayor densidad, además que la muestra son las que reportan un contenido mayor de proteína, preparado de frutas y una mayor variedad de polisacáridos, coincidiendo con una de mayor densidad.

Las muestras YB1 y YB4 presentaron la mayor diferencia de densidad (2%), a pesar de que son productos que pertenecen al mismo proveedor, lo cual puede deberse a la diferencia que tienen en la formulación.

Cuadro 3.2 Densidad relativa de diferentes yogures bebibles comerciales.

Muestra	Densidad relativa
YB1	1.0817 ^b ± 0.0015
YB2	1.0833 ^b ± 0.0005
YB3	1.1034 ^a ± 0.0083
YB4	1.1096 ^a ± 0.0048

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

3.2 Estudio reológico bajo cizalla oscilatoria

En la Figura 3.1 se muestra el barrido de deformación, donde se observa que al tener valores constantes en ambos módulos (G' y G'') en función de la deformación (γ) se comprueba que la muestra se encontraba en la zona de viscoelasticidad lineal, dentro de un intervalo de la deformación aplicada entre 0.05 y 0.5%.

En la Figura 3.2 se muestra la evolución de los módulos de almacenamiento y de pérdida en función de la frecuencia angular denominado espectro mecánico, de los diferentes yogures estudiados, se puede observar que predomina el comportamiento elástico sobre el viscoso, donde el módulo de almacenamiento es mayor que el módulo de pérdida en el intervalo de frecuencia estudiado, una tendencia similar se reportó para yogures batidos (Cuello *et al.*, 2014; Ramaswamy *et al.*, 2015). De esta manera el módulo de almacenamiento refleja la red tridimensional subsistente de la proteína láctea, mientras que el módulo de pérdida refleja las propiedades de la fase acuosa del yogur.

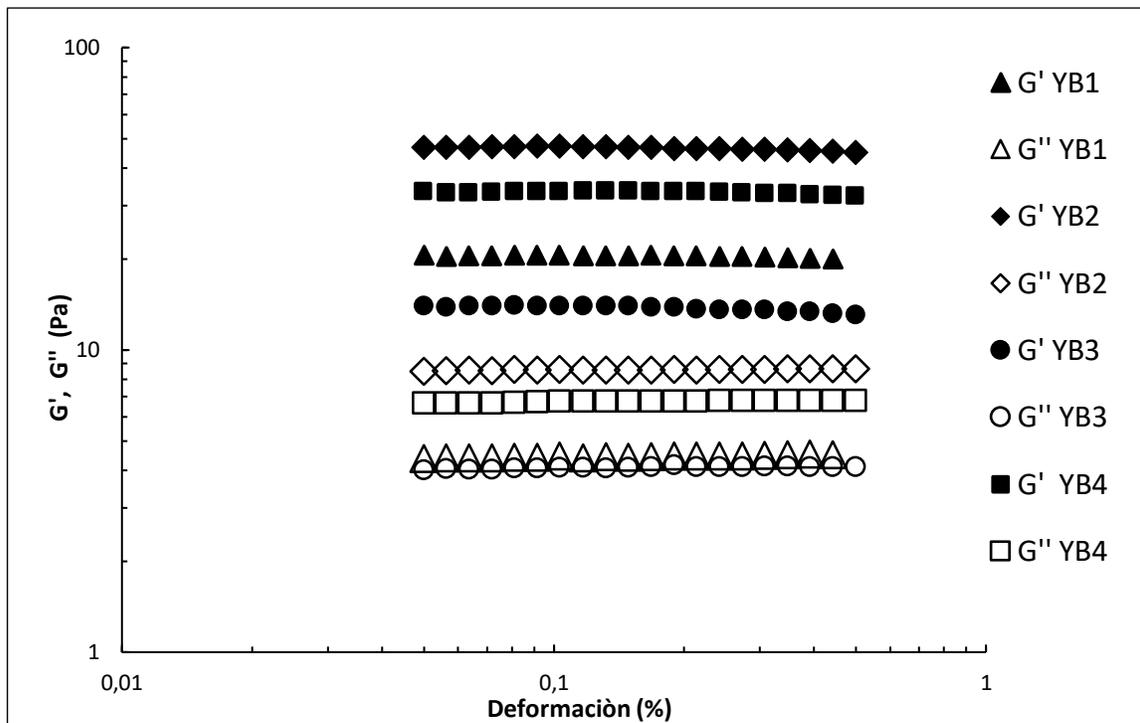


Figura 3.1 Módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la deformación aplicada.

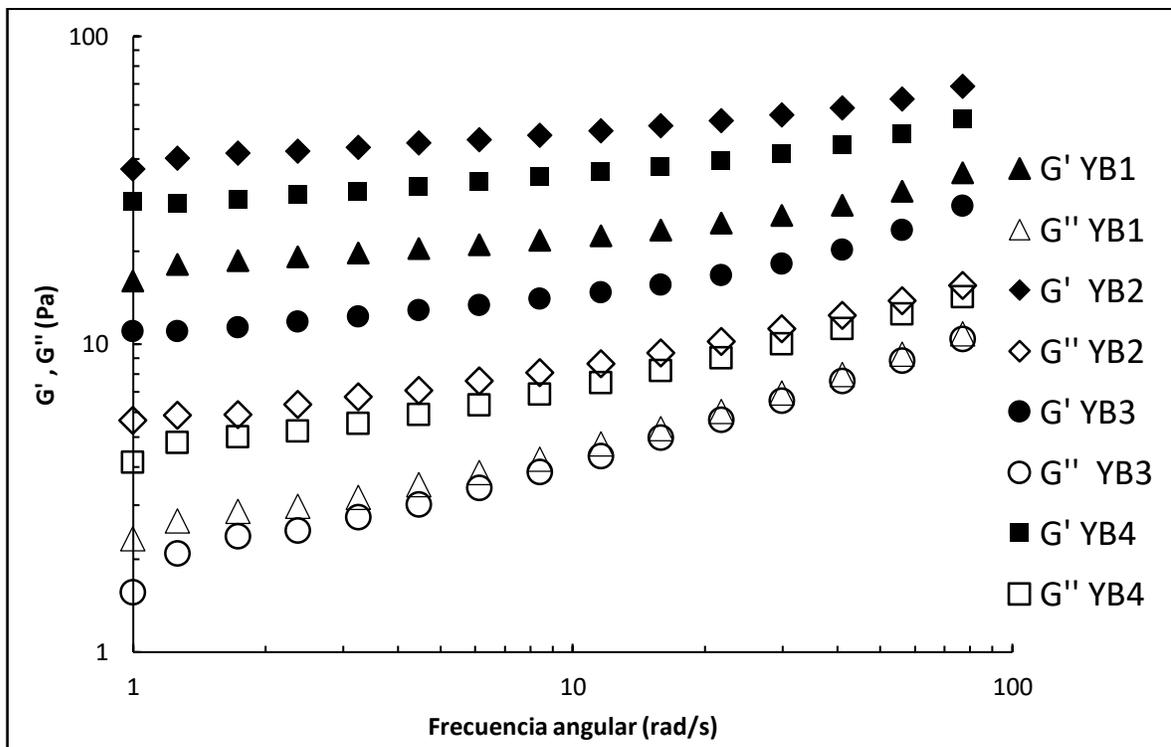


Figura 3.2 Módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la frecuencia angular.

La dependencia que presentan las muestra con respecto a la frecuencia angular indica el comportamiento típico de un gel débil (G' prevalece sobre G''), ya que los módulos aumentan de manera no lineal (Zhang, *et al.*, 2016) con el aumento de la frecuencia angular, dicho comportamiento se debe a que a baja frecuencia angular, la matriz de proteínas que conforman la red tridimensional (que contiene los glóbulos de grasa y el agua) actúa como un sólido teniendo un carácter más elástico, lo que hace que el módulo de pérdida disminuya en una mayor proporción que el módulo de almacenamiento, debido a que las fuerzas aplicadas no son suficientes para superar las fuerzas que mantienen unida a la red tridimensional (McClements, 2010), sin embargo, al incrementar la frecuencia angular, se invierte el comportamiento, lo cual se puede deber a que los enlaces que conforman la matriz se rompen haciendo que se libere el agua y la grasa contenida, por lo que el yogur fluye, lo cual se evidencia en un incremento del módulo de pérdida.

Con la finalidad de realizar una comparación de las muestras estudiadas, se tomaron los valores de los módulos de almacenamiento y pérdida a una frecuencia angular de 1 rad/s de las tres repeticiones de cada prueba y se calcularon las medidas de tendencia central. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza y la prueba de Tukey como se muestra en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3 Valores del módulo de almacenamiento (G') y el módulo pérdida (G'') a una frecuencia angular de 1 rad/s.

Muestra	G' (Pa)	G'' (Pa)
YB1	17.90 ^a ± 0.34	2.61 ^c ± 0.11
YB2	38.03 ^b ± 2.63	5.68 ^a ± 0.33
YB3	11.23 ^c ± 0.41	2.21 ^c ± 0.16
YB4	26.67 ^d ± 1.80	4.39 ^b ± 0.39

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

Todas las muestras fueron diferentes estadísticamente en el módulo de almacenamiento (G') y las muestras de YB1 y YB3 fueron estadísticamente iguales para el módulo de pérdida (G''), lo que se pudo apreciar en la Figura 3.2.

Este tipo de prueba permitió evaluar la diferencia que existe entre muestras, así como la influencia e importancia que tiene el proceso de elaboración en el comportamiento reológico, además son muy útiles porque dan información sobre la estructura remanente del yogur y pueden ser un parámetro para conocer la calidad del producto. Además, el hecho de que predomine el comportamiento sólido se debe a que presentan mayor resistencia al trabajo mecánico (Bower *et al.*, 1999) o en otras palabras una mayor resistencia a fluir, que se evidencia después de exceder un esfuerzo de cedencia. Por otro lado, el comportamiento dependiente que tiene el yogur con respecto a la frecuencia angular puede traducirse directamente en información acerca de la forma en la cual se comportará durante distintos periodos de tiempo, ya que la baja frecuencia angular se ha correlacionado con tiempos prolongados de almacenamiento (McClements, 2010).

3.3 Comportamiento al flujo bajo cizalla rotacional

3.2.1 Esfuerzo de cedencia

En la Figura 3.3 se presenta el gráfico de la deformación de cizalla en función del esfuerzo de cizalla, donde se ejemplifica el método A, para determinar el esfuerzo de cedencia, en el cual se puede observar que a bajos esfuerzos de cizalla el yogur casi no se deforma, sin embargo, una vez que se supera el esfuerzo de cedencia, la deformación es más grande y con cambio de tendencia (mayor pendiente), por lo que se considera que el material comienza a fluir. Esto se debe al rompimiento de la red tridimensional (estructura) de la muestra. Los valores de esfuerzo de cedencia se resumen en el Cuadro 3.4.

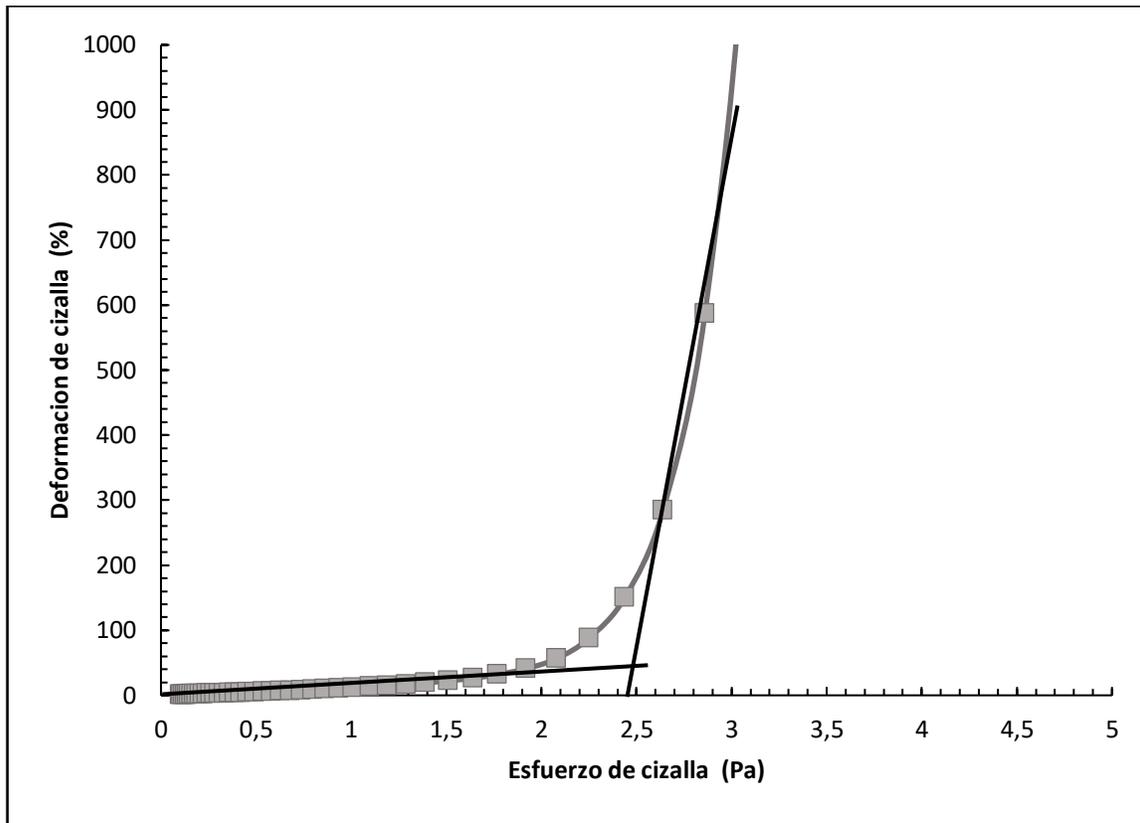


Figura 3.3 Deformación en función del esfuerzo de cizalla.

En la Figura 3.4 se presenta la curva de flujo (esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla), donde se ejemplifica el método B, para evaluar el esfuerzo de cedencia, la cual se puede dividir en dos regiones, una de comportamiento predominantemente sólido a bajas velocidades de cizalla y otra de comportamiento predominantemente líquido.

La región en la cual el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla se aproxima a cero, es decir que no se aprecia un cambio en las propiedades del yogur y es donde predomina el comportamiento tipo sólido, después de sobrepasar el esfuerzo de cedencia que es donde comienza a fluir (Rúa y Aguilera, 2005).

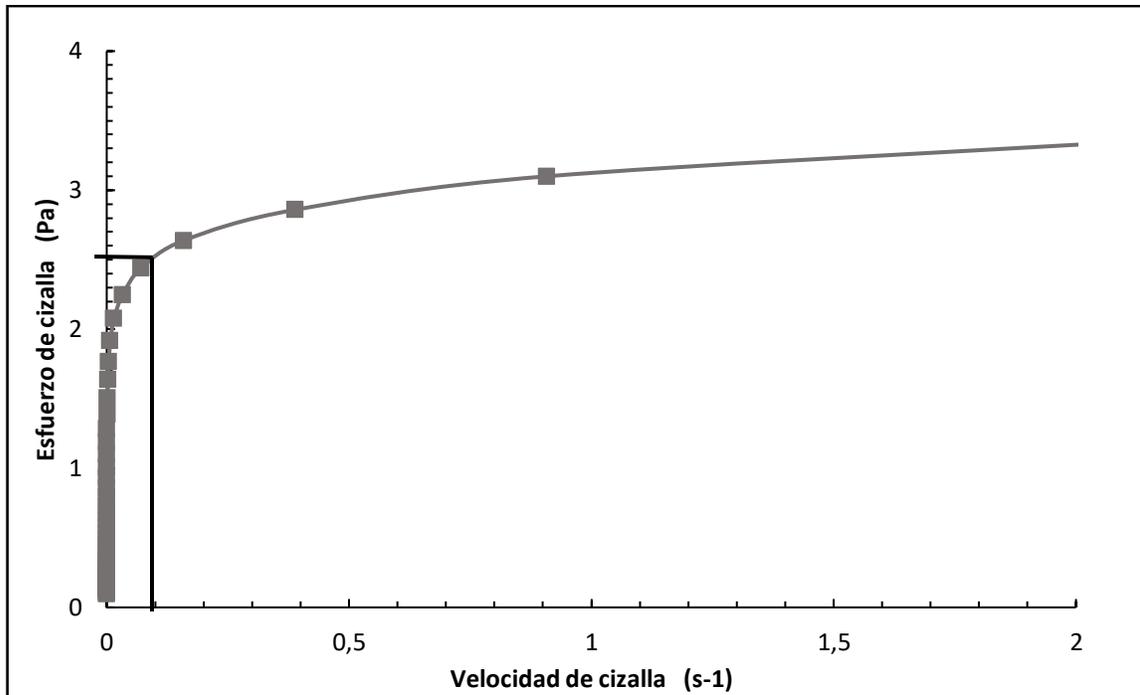


Figura 3.4 Curva de flujo a bajas velocidades de cizalla.

El promedio del esfuerzo de cedencia obtenido para cada uno de los métodos se muestra en el Cuadro 3.4, donde cada uno tuvo un coeficiente de variación menor al 1%. Se aprecia que las muestras de YB1 y YB4 presentan los mismos valores para ambos métodos, lo cual se atribuye a que provienen del mismo proveedor, aunque la formulación reportada es diferente. Por otro lado, el valor más alto del esfuerzo de cedencia lo presentó la muestra YB2 mientras que YB3 tiene el valor más bajo.

Cuadro 3.4 Valores de esfuerzos de cedencia obtenidos por dos métodos.

Muestra	Método A	Método B
YB1	2.4 ^{bA} ± 0.1	2.5 ^{bA} ± 0.1
YB2	3.1 ^{cC} ± 0.2	3.3 ^{cC} ± 0.3
YB3	1.4 ^{aB} ± 0.1	1.5 ^{aB} ± 0.1
YB4	2.5 ^{bD} ± 0.1	2.4 ^{bD} ± 0.1

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

En lo que respecta a los resultados obtenidos, no se observaron diferencias significativas entre los valores determinados por los diferentes métodos, por lo cual se propone emplear cualquiera de los métodos para determinar el valor del esfuerzo de cedencia. Sin embargo, se recomienda usar el método A debido a que presenta un coeficiente de variación menor al 3%, proporciona información más confiable, ya que se determina por la relación esfuerzo-deformación y no por la de esfuerzo-velocidad de cizalla, en la que se registran velocidades de cizalla muy pequeñas ($1 \times 10^{-04} \text{ s}^{-1}$).

De acuerdo con los valores obtenidos y haciendo una comparación entre una determinación reológica en cizalla oscilatoria y rotacional. El yogur presenta YB2 presenta mayor el valor en el módulo de almacenamiento (38.03 Pa), así como el mayor esfuerzo de cedencia y contrariamente, la muestra YB3 que tuvo el valor de G' menor (11.23 Pa), requirió del menor esfuerzo de cedencia. De esta manera se puede apreciar que mientras más elevado sea el valor del módulo, mayor será el esfuerzo requerido para hacer que fluya el yogur.

3.3.2 Dependencia del tiempo de cizallamiento

Con respecto a la dependencia del tiempo de cizallamiento en la Figura 3.5 se presentan los resultados obtenidos bajo condiciones de flujo a las diferentes velocidades de cizalla aplicadas, donde se observa una disminución de la viscosidad en función del tiempo, confirmando la tixotropía del material. Además, se observa un comportamiento fluidificante en el yogur, ya que la viscosidad inicial registrada depende de la velocidad de cizalla aplicada, lo cual es más evidente a bajos tiempos de cizallamiento, siendo las muestras YB1 y YB2 las que tuvieron mayor disminución de la viscosidad, implicando mayor destrucción de la estructura, probablemente debido a la menor densidad y menor contenido de proteína en las muestras.

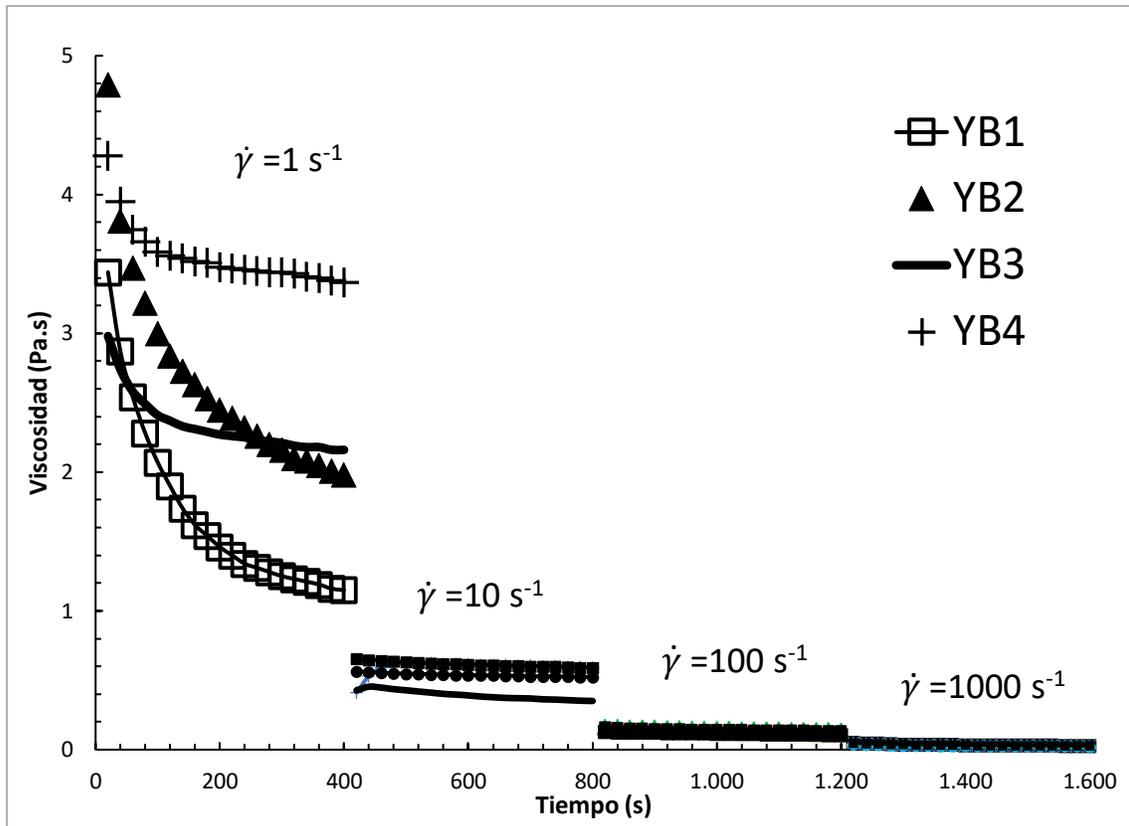


Figura 3.5 Viscosidad en función del tiempo a velocidad constante.

También se observa que esas muestras son las que contienen menor proporción de preparado de fruta, y este al ser un constituyente del yogur, puede contener espesantes, gelificantes y azúcares disueltos, que en su conjunto refuerzan la matriz proteínica del yogur, y al estar en menor proporción, se cuantifica una mayor pérdida de viscosidad.

Para visualizar el efecto entre la velocidad y tiempo de cizalla, en el Cuadro 3.5 se presentan los valores registrados al inicio de la prueba (Θ_o) o tiempo inicial y al tiempo final (Θ_f) para cada velocidad de cizalla aplicada. Se aprecia que al aplicar bajas velocidades de cizalla, la viscosidad inicial registrada fue mayor (4.78 - 2.92 Pa.s) en todos los yogures y estadísticamente diferentes. Sin embargo, se observa una mayor disminución de la viscosidad en función del tiempo de aplicación lo que confirma el comportamiento característico de un materiales fluidificante, en donde el intervalo de viscosidad obtenido fue de 1.71 a 3.7 Pa.s ya que es la primera vez

que se cizalla la muestra,. Por otra parte, al aumentar la velocidad de cizalla (10 s^{-1}), se detectó menor viscosidad inicial (0.4 - 0.6 Pa.s), además con una disminución de la viscosidad en función del tiempo de cizallamiento hasta llegar a un valor que parece constante (0.0202 - 0.0310 Pa.s), no obstante, este valor no es despreciable

Cuadro 3.5 Valores de viscosidad (Pa.s) a diferentes velocidades de cizalla y tiempos de aplicación ($\Theta_o = 10 \text{ s}$, $\Theta_f = 400 \text{ s}$) sobre la misma muestra.

Viscosidad (Pa.s)								
Muestra	$\dot{\gamma} 1 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 10 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 100 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 1000 \text{ s}^{-1}$	
	Θ_o	Θ_f	Θ_o	Θ_f	Θ_o	Θ_f	Θ_o	Θ_f
YB1	3.48 ^c ±0.03	1.21 ^c ±0.07	0.594 ^b ±0.016	0.576 ^a ±0.015	0.1633 ^a ±0.0047	0.1391 ^a ±0.0026	0.0522 ^b ±0.0003	0.0297 ^b ±0.0002
YB2	4.78 ^a ±0.09	1.90 ^b ±0.12	0.402 ^c ±0.025	0.340 ^c ±0.012	0.1503 ^b ±0.0005	0.1070 ^b ±0.0026	0.0345 ^d ±0.0005	0.0202 ^d ±0.0004
YB3	2.92 ^d ±0.08	2.09 ^b ±0.07	0.550 ^b ±0.016	0.507 ^b ±0.015	0.1240 ^c ±0.0030	0.1063 ^a ±0.0005	0.0406 ^c ±0.0002	0.0254 ^c ±0.0001
YB4	4.18 ^a ±0.18	3.37 ^a ±0.03	0.660 ^a ±0.008	0.594 ^a ±0.006	0.1613 ^a ±0.0015	0.1360 ^b ±0.0010	0.0533 ^a ±0.0002	0.0310 ^a ±0.0001

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

De acuerdo con los valores obtenidos para la viscosidad inicial a la velocidad de cizalla de 1 s^{-1} , se aprecia que está relacionada de forma directamente proporcional con el módulo de almacenamiento y el esfuerzo de cedencia ($R^2 > 0.98$ y $R^2 > 0.84$ respectivamente), es decir que al incrementarse el valor del módulo de almacenamiento mayor, así como el esfuerzo de cedencia registrado y a su vez también aumentará el valor de la viscosidad inicial detectada.

La cinética de disminución de viscosidad a cada velocidad de cizalla se calculó con el modelo de Weltman (Ec. 3). En el Cuadro 3.6 se presentan los valores obtenidos

para los parámetros A y B . El valor del parámetro A está relacionado con el esfuerzo de cedencia, ya que los valores aumentan de forma directamente proporcional ($R^2 > 0.94$); sin embargo, esta resistencia disminuye conforme se incrementa la velocidad de cizalla que se aplica.

Cuadro 3.6 Parámetros para el modelo de Weltman.

Muestra	$\dot{\gamma} 1 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 10 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 100 \text{ s}^{-1}$		$\dot{\gamma} 1000 \text{ s}^{-1}$	
	A (Pa.s)	B (s ⁻¹)	A (Pa.s)	B (s ⁻¹)	A (Pa.s)	B (s ⁻¹)	A (Pa.s)	B (s ⁻¹)
YB1	5.82 ^b ± 0.12	-0.78 ^d ± 0.008	0.95 ^a ± 0.01	-0.55 ^a ± 0.04	0.59 ^a ± 0.05	-0.06 ^b ± 0.007	0.34 ^b ± 0.005	-0.04 ^a ± 0.01
YB2	7.45 ^a ± 0.56	-0.88 ^c ± 0.01	1.30 ^c ± 0.12	-0.14 ^b ± 0.01	0.83 ^b ± 0.02	-0.10 ^b ± 0.004	0.22 ^a ± 0.002	-0.02 ^a ± 0.001
YB3	3.57 ^b ± 0.09	-0.25 ^b ± 0.002	0.91 ^a ± 0.02	-0.11 ^b ± 0.008	0.43 ^c ± 0.88	-0.04 ^b ± 0.008	0.27 ^a ± 0.004	-0.03 ^a ± 0.001
YB4	4.74 ^b ± 0.27	-0.40 ^a ± 0.04	1.23 ^c ± 0.03	-0.15 ^b ± 0.005	0.55 ^a ± 0.31	-0.05 ^b ± 0.003	0.36 ^b ± 8.88	-0.04 ^a ± 0.001

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

El valor negativo del parámetro B indica la velocidad con la que disminuye la viscosidad, lo que implica un daño o ruptura estructural en el yogur (Basak y Ramaswamy, 1994). Se puede apreciar que al aplicar velocidades de cizalla más altas subsecuentes en la misma muestra (100 - 1000 s⁻¹), el parámetro B es mucho más pequeño que a las velocidades de cizalla bajas, lo que implica que la estructura tridimensional del yogur no se puede destruir más, ya que la velocidad de cambio tiende a ser constante.

Con el cizallamiento aplicado a 1000 s⁻¹, todas las muestras tuvieron daño estructural similar al registrarse un parámetro B en el intervalo de 0.02 a 0.04 s⁻¹, lo cual se debe a que la muestra ya había sido cizallada durante más de 15 minutos,

mientras que a la velocidad de cizalla de 1 s^{-1} , todas las muestras son diferentes estadísticamente para el parámetro B , mientras que para las velocidades de cizalla intermedia de 100 s^{-1} fue estadísticamente igual en todas las muestras.

En cuanto al parámetro A , se aprecian los valores más altos dentro del cual la muestra de YB2 fue la única estadísticamente diferente, al tener el mayor valor para las primeras 3 velocidades aplicadas, lo cual indica que opone más resistencia a fluir, lo cual es congruente con los valores obtenidos para el esfuerzo de cedencia, aunque también muestra el mayor daño estructural (0.88 s^{-1}) a bajas velocidades de cizalla (1 s^{-1}).

Las muestras YB3 y YB4 presentaron una menor velocidad de daño estructural, ya que, tienen una menor disminución de la viscosidad y los valores del parámetro B son menores a 0.5 s^{-1} , lo que pudiera atribuirse a que hay un mayor contenido de proteínas en su composición haciendo que la red tridimensional sea más resistente al cizallamiento debido a que se refuerza a la matriz de proteínas (McClements, 2010), aunque también puede ser debido a que presentan una densidad mayor y no hay mucho que dañar estructuralmente. Sin embargo, los resultados fueron estadísticamente iguales para la velocidad de cizalla de 10 s^{-1} a excepción de la muestra YB1 lo que se puede atribuirse al mayor contenido de grasa reportado, por lo tanto, hay mayor cantidad de glóbulos de grasa los cuales con el cizallamiento se separan lo que genera que se aprecie un mayor valor.

De igual manera, la muestra YB2 presentó la mayor viscosidad inicial, la mayor resistencia al flujo (Parámetro A), así como la mayor velocidad con la que ocurre el daño estructural para las velocidades de cizalla más bajas, lo cual se refleja en el parámetro B de la ecuación de Weltman, ya que al tener un valor elevado indica que hay más daño estructural.

Este tipo de prueba es útil para la selección de sistemas de bombeo o equipos de intercambio de calor, se recomienda medir la viscosidad a velocidad de cizalla constantes, ya que proporciona condiciones similares a las que se mantendrán en la tubería y considerar la viscosidad inicial o el valor obtenido en el parámetro A de la ecuación de Weltman, como un valor aproximado (probable sobredimensionamiento), ya que dicho modelo proporciona información de la fragilidad de la estructura tridimensional por el cizallamiento.

3.3.3 Curvas de flujo

Las curvas de flujo para cada muestra de yogur se muestran en las Figuras 3.6 a 3.9, donde se puede observar que las réplicas se sobreponen para cada segmento y presentaron tendencias de comportamiento de fluido no-newtoniano. Se puede apreciar que los diferentes yogures bebibles comerciales mostraron bucle de histéresis característico de los materiales tixotrópicos, obtenido en las curvas de ascenso-mantenimiento-descenso de velocidad de cizalla, donde las curvas de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla no coinciden, lo que genera que se produzca dicho bucle característico de este tipo de fluidos (Ancy, 2005). Además, se observa un esfuerzo de cedencia en la curva de ascenso de velocidad de cizalla.

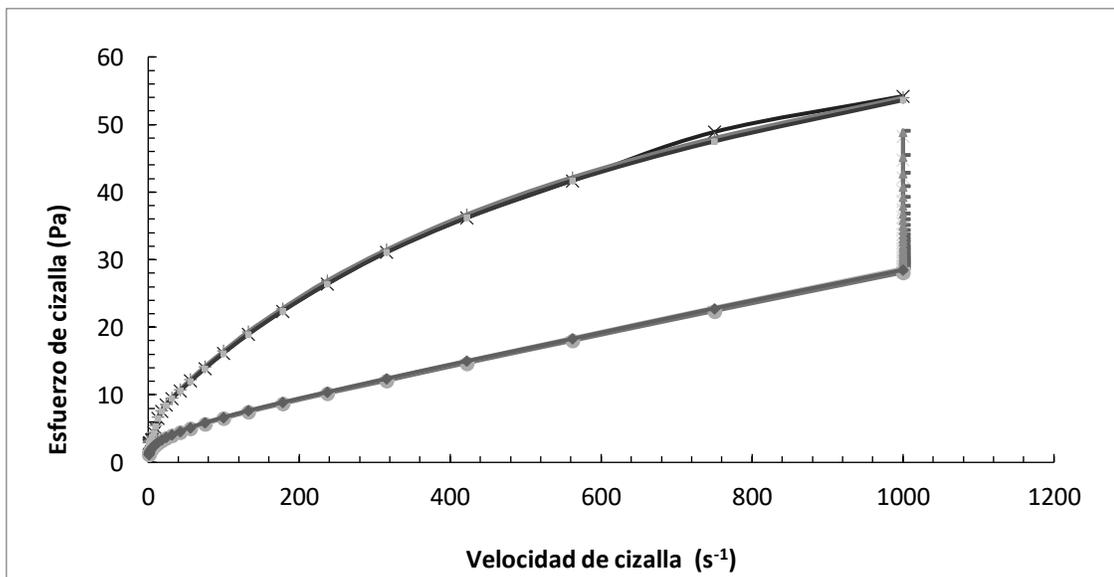


Figura 3.6 Curva de flujo de yogur comercial YB1.

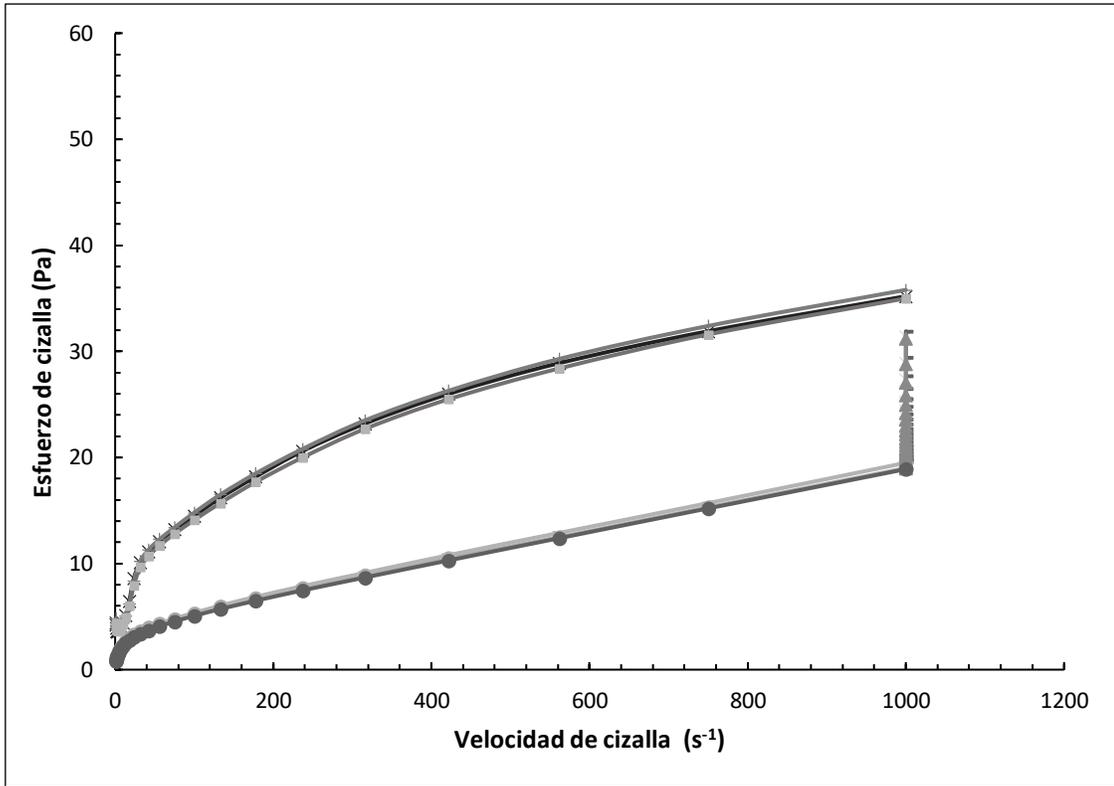


Figura 3.7 Curva de flujo de yogur comercial YB2.

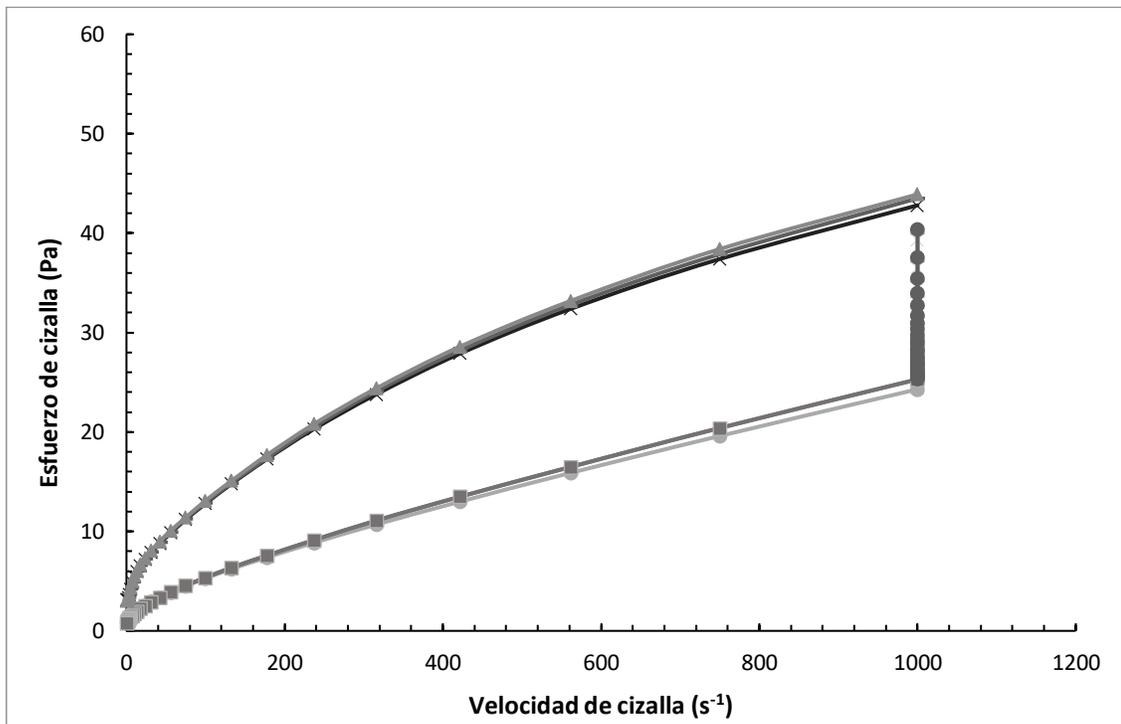


Figura 3.8 Curva de flujo de yogur comercial YB3.

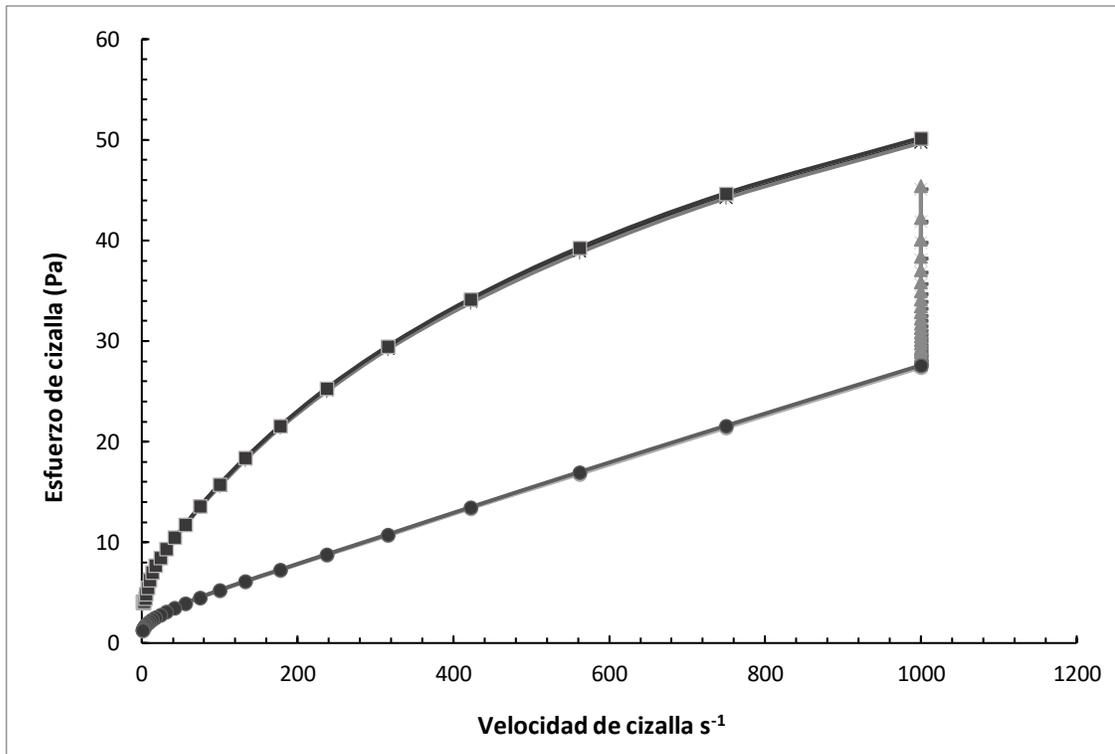


Figura 3.9 Curva de flujo de yogur comercial YB4.

Al comparar el área entre las curvas de ascenso-descenso de velocidad de cizalla (Cuadro 3.7), el método permitió evidenciar la diferencia que existe entre los distintos tipos de yogures analizados, aunque las muestras YB2 y YB3 son estadísticamente similares. Es importante mencionar que las muestras del mismo proveedor (YB1 y YB4), mostraron mayor área del bucle de histéresis, o mayor tixotropía, sin observarse relación con la densidad evaluada en el producto o con el índice de refracción, sin embargo, al comparar las diferencias en la formulación se puede apreciar al tener un contenido de grasa y proteína en igual proporción (1.6 y 1.6% respectivamente) como es el caso de la muestra YB2 hay una disminución del área del bucle de histéresis, de esta forma la muestra YB1 al tener una diferencia del 45% (3.5% de grasa y 1.6% de proteína) presenta el mayor bucle de histéresis. Este resultado puede estar relacionado con los espacios vacíos de mayor tamaño dentro de la matriz de proteínas (Laiho, *et al.*, 2017), que es más fácil de romper.

Cuadro 3.7. Área del bucle de histéresis.

Muestra	Área (Pa/s)
YB1	19913 ^a ± 181
YB2	14207 ^b ± 175
YB3	14340 ^b ± 114
YB4	18940 ^c ± 153

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

Con la finalidad de obtener los parámetros que describen la curva de flujo, los resultados obtenidos para la curva de ascenso de velocidad de cizalla se ajustaron al modelo Herschel-Bukley (Cuadro 3.8). Debido a que la muestra YB2 presentó fluctuaciones a baja velocidad de cizalla solamente se consideró un intervalo de 10 a 1000 s⁻¹ ya que $R^2 > 0.98$, por lo cual para un mejor análisis y comparación se utilizó el mismo intervalo en el resto de las muestras.

Cuadro 3.8 Parámetros reológicos del modelo Herschel-Bukley para la curva de ascenso de velocidad de cizalla.

Muestra	K (Pa.s ⁿ)	n	σ_0 (Pa)	Intervalo
YB1	1.538 ^b ± 0.042	0.516 ^b ± 0.004	0.42 ^a ± 0.01	10-1000 s ⁻¹
YB2	2.165 ^a ± 0.082	0.417 ^a ± 0.007	0.22 ^b ± 0.01	10-1000 s ⁻¹
YB3	0.949 ^c ± 0.006	0.544 ^c ± 0.003	0.60 ^c ± 0.01	10-1000 s ⁻¹
YB4	0.953 ^c ± 0.004	0.562 ^c ± 0.002	1.87 ^d ± 0.05	10-1000 s ⁻¹

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

La muestra YB2 presentó los valores del índice de consistencia mayores (2.15 Pa.sⁿ), pero el menor índice de comportamiento al flujo (0.41), lo que indica

una alta dependencia de la velocidad de cizalla. La muestra YB4, por el contrario, fue menos dependiente de la velocidad de cizalla (0.56), lo que indica que es menos susceptible a perder su estructura por el cizallamiento. Los valores menores a la unidad, reafirman que el yogur es un material fluidificante a la cizalla (Steffe, 1996).

De acuerdo con los valores obtenidos del esfuerzo de cedencia se puede apreciar que las muestras que presentaron mayor índice de refracción y mayor densidad oponen mayor resistencia a fluir y presentan mayor índice de comportamiento al flujo, por lo tanto, las muestras YB3 y YB4 al tener una alta densidad relativa 1.1034 y 1.1096, aunque estadísticamente similar, presentaron los esfuerzos de cedencia más altos (0.6–1.8 Pa), y valores del índice de consistencia estadísticamente semejantes. De esta manera se hizo más notable la influencia de la densidad sobre el comportamiento al flujo del yogur bebible.

Con la finalidad de visualizar la dependencia de la viscosidad con el tiempo de cizallamiento en este tipo de prueba, se elaboró la Figura 3.10, en donde también se observa la dependencia de la viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla en el ciclo de ascenso-mantenimiento-descenso de la velocidad de cizalla. Todas las muestras presentaron una disminución de su viscosidad en función del aumento de la velocidad de cizalla aplicada, comportamiento característico de un material fluidificante a la cizalla y tixotrópico (Steffe, 1996).

Se aprecia en la Figura 3.10, que la muestra YB2 mostró el valor máximo de viscosidad, al inicio de la prueba (4.43 Pa.s), lo que es congruente ya que presentó el mayor índice de consistencia, sin embargo, al tener el menor índice de comportamiento al flujo (0.41) también es la que tiene la mayor disminución al finalizar el ascenso de la velocidad de cizalla (0.03 Pa.s), lo cual reafirma su alta dependencia a la velocidad de cizalla aplicada.

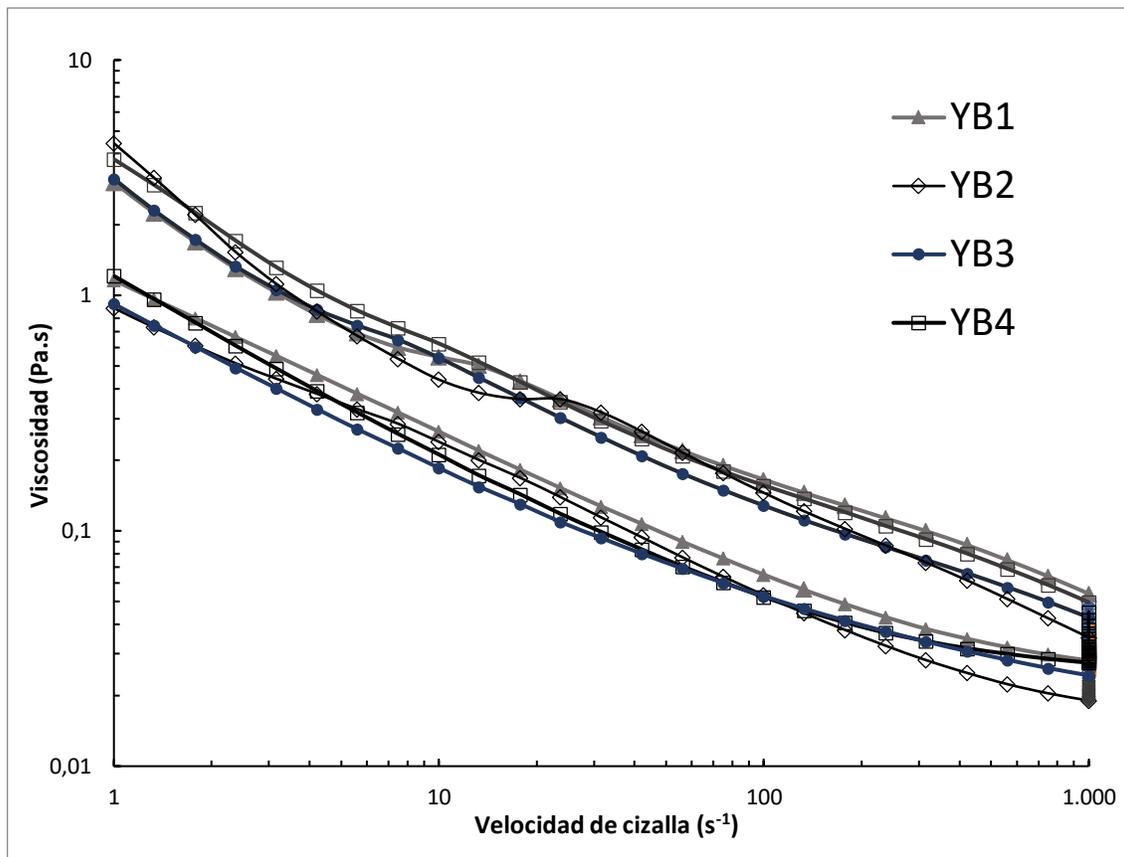


Figura 3.10 Relación de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla.

En la Figura 3.10, se observa que las curvas de ascenso de la velocidad de cizalla no disminuyen proporcionalmente de la misma manera en las velocidades de cizalla bajas que en las altas, por ejemplo en la muestra YB2, al inicio del cizallamiento, la viscosidad en función de la velocidad de cizalla disminuye proporcionalmente, pero a una velocidad de cizalla mayor ($10 - 20 \text{ s}^{-1}$) los valores de la viscosidad se mantienen casi constantes, por lo que se observa una meseta, sin embargo, al superar la velocidad de cizalla de 30 s^{-1} se observa de nuevo una disminución proporcional de función de la velocidad de cizalla, aunque las pendientes son diferentes entre sí. Este comportamiento puede ser debido a que se manifiesta el carácter más elástico de la muestra a bajas velocidades de cizalla, en donde se destruye parcialmente la red tridimensional. En condiciones de flujo las macromoléculas y glóbulos de grasa, entre otros, se alinean en la dirección del flujo (McClements, 2010), por lo que la disminución es proporcional a la velocidad de

cizalla con una pendiente diferente, y por lo tanto se ajusta al modelo de Herschel-Bulkley.

Además, se puede apreciar que al mantener la velocidad de cizalla constante (1000 s^{-1}) durante un tiempo determinado (400 s) hay una disminución de la viscosidad, lo cual se evidencia mejor en la Figura 3.11, ya que la diferencia que existe en los valores de la viscosidad entre algunas de las muestras es muy pequeña por lo cual no se aprecia tan claramente en la segunda condición de cizallamiento en la Figura 3.10, por lo tanto, esto evidencia que las muestras no han alcanzado el equilibrio hidrodinámico, ya que la viscosidad no es constante en función del tiempo de aplicación de la velocidad de cizalla.

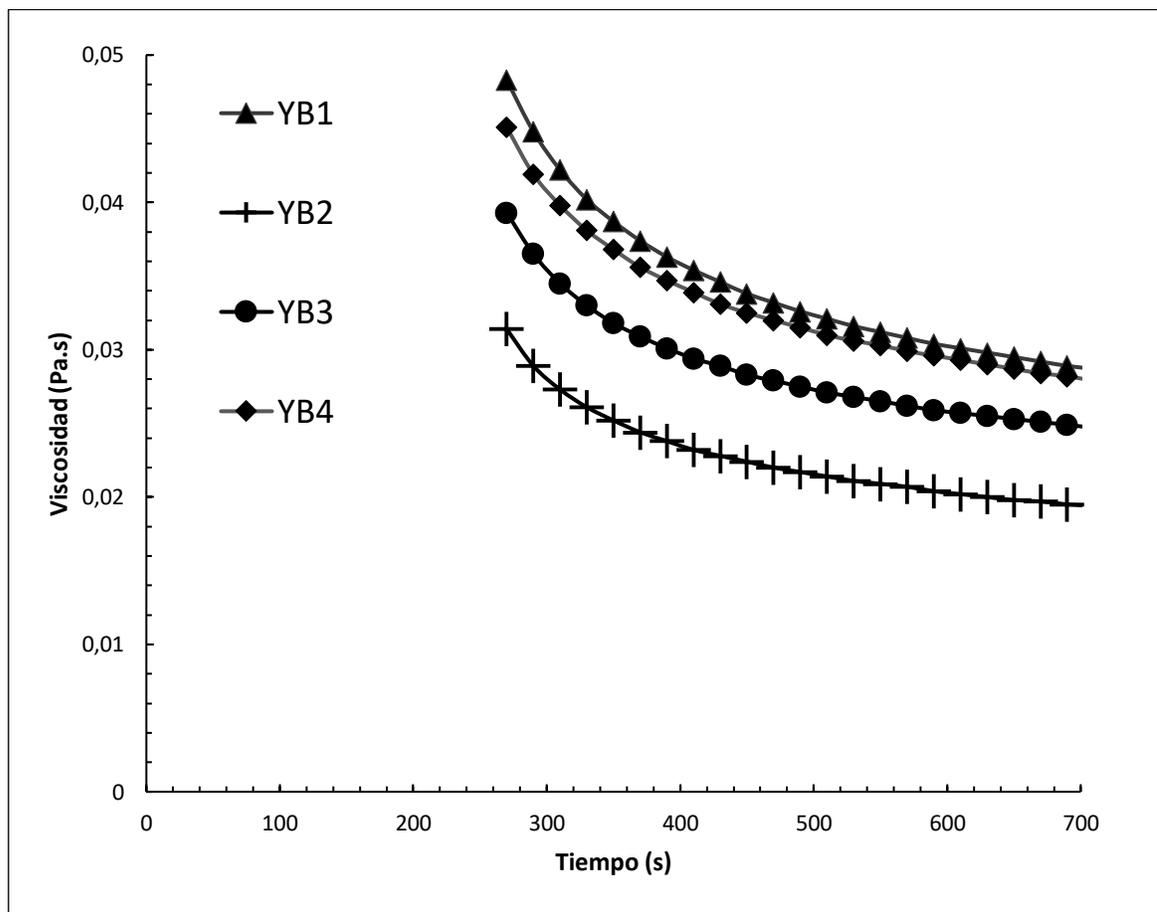


Figura 3.11 Viscosidad en función del tiempo de aplicación para la condición a velocidad de cizalla constante ($\dot{\gamma} = 1000 \text{ s}^{-1}$).

Por otro lado, se observa que los dos yogures que pertenecen al mismo proveedor, como es el caso de las muestras YB1 y YB4, presentaron una mayor viscosidad, lo cual puede deberse a que contienen xantana lo que genera una mayor viscosidad (Mathias *et al.*, 2013).

Los datos obtenidos para el segundo segmento de la curva de flujo también se ajustaron al modelo de Weltman para determinar el efecto que tiene la aplicación de un cizallamiento previo durante 250 s, sobre los parámetros A y B . El valor de las constantes de dicho modelo se muestra en el Cuadro 3.9.

Cuadro 3.9 Parámetros para el modelo de Weltman.

Muestra	A (Pa.s)	B (s ⁻¹)
YB1	0.141 ^a ± 0.0015	- 0.017 ^a ± 0.0006
YB2	0.085 ^b ± 0.0010	- 0.010 ^a ± 0.0006
YB3	0.106 ^c ± 0.0008	- 0.012 ^a ± 0.0006
YB4	0.125 ^d ± 0.0010	- 0.015 ^a ± 0.0006

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

Comparando el valor del parámetro B del modelo de Weltman para la velocidad de cizalla de 1000 s⁻¹ resumido en el Cuadro 3.5 (0.02 a 0.04 s⁻¹) y los obtenidos por cizallamiento subsecuente sobre la misma muestra, en el Cuadro 3.9 (0.01 a 0.017 s⁻¹) se puede observar que el aplicar un cizallamiento progresivo (ascenso de velocidad de cizalla), previo al cizallamiento constante de 1000 s⁻¹, provoca que el parámetro B sea más pequeño, por lo tanto implica que hubo menor daño en la red tridimensional del yogur, aunque por este método no se detectaron diferencias significativas. Por otro lado, el parámetro A se relaciona de forma directamente proporcional con el índice de comportamiento al flujo (n) obtenido en la curva de ascenso de velocidad de cizalla ($R^2 > 0.86$).

Los resultados obtenidos para la curva de descenso de velocidad de cizalla se ajustaron a diferentes modelos reológicos. Los valores obtenidos para cada uno de los parámetros correspondientes a cada modelo reológico se muestran en el Cuadro 3.10.

Cuadro 3.10 Parámetros reológicos para la curva de descenso de velocidad de cizalla.

Muestra	K (Pa.s ⁿ)	n	σ_0 (Pa)
YB1	$0.6^b \pm 0.006$	$0.53^b \pm 0.001$	$0.66^b \pm 0.03$
YB2	$0.9^a \pm 0.035$	$0.39^c \pm 0.004$	
YB3	$0.3^c \pm 0.023$	$0.62^a \pm 0.019$	$0.57^c \pm 0.02$
YB4	$0.2^d \pm 0.001$	$0.66^d \pm 0.005$	$1.09^a \pm 0.02$

Valores con la misma letra en cada columna indican que las medias son estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05 \pm$ Desviación estándar).

Para el caso de las muestras YB1, YB3 y YB4 se utilizó el modelo Herschel-Bukley (Ec. 2), ya que fue el modelo reológico que mejor se ajustó a los datos experimentales de la curva de descenso de velocidad de cizalla., mientras que para la muestra YB2 fue el modelo de Ostwald de Waele (Ec. 1) o modelo de la potencia.

La muestra YB2 presentó un valor de índice de consistencia de 0.9 Pa.sⁿ y su índice de comportamiento al flujo fue de 0.39, es decir que es más dependiente de la velocidad de cizalla aplicada después de aplicar un cizallamiento constante, además, deja de oponer una resistencia a fluir, mientras que en las muestras YB1 y YB3 se aprecia que al aumentar el índice de comportamiento al flujo disminuye el esfuerzo de cedencia calculado. La muestra YB4 se comportó como un fluido newtoniano, lo cual se puede deber a la mayor densidad, mayor índice de refracción y mayor contenido de proteína ya que se refuerza la matriz por lo cual aun después del ciclo de cizallamiento sigue poniendo una mayor resistencia a fluir en comparación con las otras muestras.

Se aprecia que el índice de consistencia se comportó de manera similar en la curva de ascenso y descenso de velocidad de cizalla, siendo la muestra YB2 la que presenta la mayor consistencia en la curva de ascenso y en la de descenso de velocidad de cizalla, mientras que la muestra YB4 y YB3 presentaron la menor consistencia durante todo el cizallamiento.

La información sobre la viscosidad se utiliza en el diseño y selección de equipos, incluyendo agitadores, tuberías, bombas e intercambiadores de calor, por lo tanto, es necesario contar con valores apropiados para el diseño de cualquier proceso. La comprensión de las propiedades reológicas es útil para el desarrollo de nuevos productos ya que determina cómo se comportarán los productos nuevos en comparación con los existentes (McClements, 2010; Steffe, 1996).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de las propiedades fisicoquímicas y la densidad de los diferentes yogures bebibles comerciales sabor fresa, se pudo observar en el pH en el cual todas muestras presentaron un valor inferior a 4.5 donde las diferencia entre los valores es un efecto del proceso de fermentación y la formulación. Las muestras presentaron la mayor diferencia de densidad fueron YB1 y YB4 (2 %), aunque pertenecen al mismo fabricante, lo cual evidencia que la ausencia o aumento de un componente en la composición del producto puede causar un cambio notable sobre las propiedades del yogur.

Todas las muestras presentaron comportamiento viscoelástico, un comportamiento fluidificante a la cizalla y dependiente del tiempo de cizallamiento (tixotrópico).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización reológica mediante la aplicación de cizalla oscilatoria, se evidenció comportamiento viscoelástico, ya que el módulo de almacenamiento fue superior al módulo de pérdida en el espectro mecánico obtenido, lo que indica que se comportan más como un sólido que como un fluido, en condiciones de baja deformación, en el que todos los yogures fueron estadísticamente diferentes.

Se determinó el esfuerzo de cedencia, lo que confirmó el comportamiento predominantemente sólido antes de fluir, donde las muestras YB1 y YB4 no fueron estadísticamente diferentes, además no hubo diferencias entre los valores calculados por los diferentes métodos, prueba bajo cizalla rotacional aplicando bajos esfuerzos de cizalla, midiendo la deformación (método A) o la velocidad de cizalla (método B) resultantes. Sin embargo, se recomienda utilizar el método A ya que es más exacto.

En el caso de la dependencia del tiempo de cizallamiento, cuando se aplicaron velocidades de cizalla subsecuentes, los yogures con menor cantidad de proteínas (YB2 y YB1) presentaron el mayor daño estructural, ya que la constante B del modelo de Weltman, que describe la dependencia con el tiempo de cizallamiento, fue la mayor. Además, los valores obtenidos para la viscosidad inicial evaluada a la velocidad de cizalla de 1 s^{-1} , se relacionaron con el módulo de almacenamiento y el esfuerzo de cedencia.

Bajo condiciones de flujo, al realizar la curva de ascenso-descenso de la velocidad de cizalla, los yogures presentaron el bucle de histéresis característico de materiales tixotrópicos, debido al rompimiento de la matriz de proteínas formada (estructura tridimensional). Las muestras que presentaron la mayor área en el bucle de histéresis fueron la YB1 y YB4, que son del mismo fabricante y los valores mayores del esfuerzo de cedencia obtenido a través del ajuste de los diferentes modelos reológicos que describen la curva de ascenso y descenso de velocidad de cizalla. La diferencia que existió en los esfuerzos de cedencia evaluados en los yogures es debido a la diferencia que existe en su formulación, siendo las muestras YB1 y YB4, a las únicas que se adicionó xantana como estabilizante, lo que pudiera influir en su mayor tixotropía y esfuerzo de cedencia.

Al comparar el esfuerzo de cedencia dinámico, con los obtenidos por los diferentes métodos estáticos, se observan valores muy diferentes, relacionado con el tipo de prueba que se utiliza para su determinación, por lo cual este parámetro no tiene un valor único y deberá usarse con cautela.

Además, se pudo apreciar que se obtiene información diferente de cada prueba, lo que permitió evaluar propiedades relacionadas con la sensación en la boca (tixotropía) o la tendencia de un material a pegarse en el paladar (propiedad viscoelástica), la estabilidad durante el almacenamiento (cizalla oscilatoria), selección de sistemas de bombeo o equipos de intercambio de calor (pruebas a velocidad de cizalla constante o bucle de histéresis), información de la fragilidad de

la estructura tridimensional por el cizallamiento (Método A o Método B), así como la diferencia que existe entre muestras, por lo que, antes de evaluar la reología del yogur, es importante identificar lo que se desea analizar sobre una determinada muestra para hacer la selección adecuada de la prueba a realizar.

REFERENCIAS

- Aguilar-Morales, J. (2012). *Métodos de Conservación de Alimentos*. México: Red Tercer Milenio.
- Aldabe, P., Aramendia, S. (2007). *Química 2: Química en Acción*. Argentina: Colihue.
- Ancey, C. (2005). *Notebook Introduction to Fluid Rheology*. Suiza: Lausanne.
- Andrade, E. H. P., Silva, N. M. A., Resende, M. F. S., Souza, M. R., Fonseca, L. M., Cerqueira, M. M. O. P., Leite, M. O. (2015). Microbiological and physical-chemical characteristics of fermented milk beverages. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 67, 1735-1742.
- Aportela-Palacios, A., Sosa-Morales, M. E., Vélez-Ruiz, J. F. (2005). Rheological and physicochemical behavior of fortified yogurt, with fiber and calcium. *Journal of Texture Studies*, 36, 335-349.
- Arazazu-Montero, M., Limia-Sanchez, A., Perez-Landeras, P., Quintana De Arcos, C., Franco-Vargas, E., Moreno-Alcade, S. (2007). *Leches Fermentadas en la Comunidad de Madrid*. España. Dirección General de Salud Pública y Alimentación.
- Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos*. (4th ed.). México: Pearson.
- Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Basak, S., Rarnaswamy, H. S. (1994). Simultaneous evaluation of shear rate and time dependency of stirred yogurt rheology as influenced by added pectin and strawberry concentrate, 21, 385-393.
- Basiri, S., Haidary, N., Shekarforoush, S. S., Niakousari, M. (2018). Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt. *Carbohydrate Polymers*, 187, 59-65.
- Bedolla, B., Dueñas, G., Favela, T., Guerrero, H., Mendoza, M., Navarrete, L., Ortiz, G. (2003). *Introducción a la Tecnología de Alimentos*. México: Limusa.
- Bower, C., Gallegos, C., Mackley, M., Madiedo, J. (1999). The rheological and microstructural characterization of the non lineal flow behaviour. *Rheologica*

- Acta*, 38, 145-159.
- Burns, R. A., Escalona- García, H. J. (2003). *Fundamentos de Química* (4 ed). Pearson.
- Bylund, M., Gómez, L. (2003). *Manual de Industrias Lácteas*. España: Mundi-Prensa.
- Cámpora, C. (2016). Alimentos funcionales: tecnología que hace la diferencia. *Revistas de Investigaciones Agropecuarias*, 42, 131-137.
- Cuello, R. E., Mendoza, J. P., Suarez, N. A. (2014). Efecto de la microencapsulación sobre las propiedades reológicas y fisicoquímicas del yogurt blando. *Información Tecnológica*, 25, 45-56.
- Early, R. (1998). *Tecnología de los Productos Lácteos* (2nd ed.). España: Acribia.
- Eskin, M., Shahidi, F. (2015). *Bioquímica de Alimentos* (3a ed.). USA: Elsevier.
- Gallego, H., Álvarez, C., Vélez, C., Fernández, A. (2012). Caracterización Reológica de dos salsas alimentarias. *Vitae*, 19, 433-435.
- García-Garibay, M., Quintero-Ramírez, R., López-Munguía, A. (1993). *Biotechnología Alimentaria*. México: Limusa.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias* (3ª ed.). México: Continental.
- Gil, A. (2010). *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos* (2ª ed.). España: Panamericana.
- Granato, D., Branco, G., Gomes, C., Fonseca, F., Nagendra, S. (2010). Probiotic dairy products as functional foods. *Food Science and Food Safety*, 9, 455-470.
- Gutiérrez, G., Trujillo, M., Gómez, G. (2017). Comparative study of normal and functional dairy products consumption in climacteric and non-climacteric women. *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria*, 37, 98-103.
- Haque, A., Richardson, R. K., Morris, E. R. (2001). Effect of fermentation temperature on the rheology of set and stirred yogurt. *Food Hydrocolloids*, 15, 593-602.
- Hernández, A. (2003). *Microbiología Industrial*. Costa Rica: EUNED.
- Huertas-Parra, A. R. (2012). Yogur en la salud humana. *Lasallista*, 9, 162-177.

- Iličić, M. D., Milanović, S. D., Carić, M. D., Vukić, V. R., Kanurić, K. G., Ranogajec, M. I., Hrnjez, D. V. (2013). The effect of transglutaminase on rheology and texture of fermented milk products. *Journal of Texture Studies*, 44, 160-168.
- Kok, M. S. (2010). Characterization of galactomannan stabilised yogurt drink using dynamic rheology. *International Journal of Food Properties*, 13, 209-220.
- Laiho, S., Williams, R. P. W., Poelman, A., Appelqvist, I., Logan, A. (2017). Effect of whey protein phase volume on the tribology, rheology and sensory properties of fat-free stirred yoghurts. *Food Hydrocolloids*, 67, 166-177.
- Liu, L., Li, C., Liu, J. (2017). Rheological and physical characteristics of non-fat set yogurt prepared with EPS-producing *Streptococcus thermophilus* and an H⁺ ATPase-defective mutant *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgaricus. *International Journal of Food Properties*, 20, 745-753.
- Martínez-Padilla, L. P. (2012). Guía de uso del reómetro MCR301. *Documento Interno LAPRYFAL, FES Cuautitlán, UNAM*.
- Mathias, T. R. dos S., Andrade, K. C. S., Silva, C. L., Silva, B. A. (2013). Avaliação do comportamento reológico de diferentes iogurtes comerciais. *Journal of Food Technology*, 16, 12-20.
- McCarthy, O. J. (2011). Rheology of liquid and semi-solid milk products. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2, 520-531.
- McClements, D. J. (2010). *Food emulsions: Principles, Practice and Techniques*. USA: CMC Press.
- Mott, L. R. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada*. México: Prentice Hispanoamericana.
- Osorio G., R. D. (2009). *Manual de Técnicas de Laboratorio Químico*. Colombia: Universidad de Antioquía.
- Palencia M., Y. (2001). Los alimentos lácteos y sus limitaciones. *Medicina Naturista*, 3, 137-152.
- Pauletti, M., Rozycki, S., Sabbag, N., Costa, S. (2003). Modelización de la consistencia de yogur batido: efecto de la adición de varios gelificantes. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4, 90-94.
- PROFECO (2004). Bebidas lácteas fermentadas. *Consumidor*, 2, 42-44.

- PROFECO (2017). Y se hizo el yogurt. *Consumidor*, 9, 28-41.
- Ramaswamy, H. S., Chen, C. R., Rattan, N. S. (2015). Comparison of viscoelastic properties of set and stirred yogurts made from high pressure and thermally treated milks. *International Journal of Food Properties*, 18, 1513-1523.
- Ramírez, J. C., Ulloa, P., Velázquez, M., Ulloa, J., Arce, F. (2011). Bacterias lácticas: Importancia en alimentos y sus efectos en la salud. *Revista Fuente*, 7, 1-17.
- Rao, A. (1999). *Rheology of Fluid and Semisolid: Foods Principles and Applications*. USA: Aspen.
- Ratner, R., Hernandez, P., Martel, J., Atalah, E. (2017). Propuesta de un nuevo índice de calidad global de la alimentación. *Revista Chilena de Nutrición*, 44, 39-44.
- Rivas, A. H., Velez, J. F. (2001). Propiedades y características del yogurt. *Revista Internacional Información Tecnológica*, 12, 35-42.
- Rohm, H., Kovač, A. (1995). Effects of starter cultures on small deformation rheology of stirred yoghurt. *Food Science and Technology*, 28, 319-322.
- Romero-Castillo, S. R., Mestres-Lagarriga, J. (2004). *Productos Lácteos: Tecnología*. España: UPC.
- Rúa, M. O. B., Aguilera, G. (2005). An approach to the modeling yield stress in mineral suspensions. *Dyna*, 146, 13-26.
- Shiby, V. K., Mishra, H. N. (2013). Fermented Milks and Milk Products as Functional Foods-A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53, 482-496.
- Silva-Rubio, L. A., Bermudez-Huertas, A., Betancourt-Ortiz, R. (2013). Lácteos: Nuevas Tecnologías en Derivados Lácteos. Colombia: *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering* (2nd ed.). USA: East Lansing.
- Tamime, A. Y., Robinson, R. K. (2007). *Yoghurt: Science and technology* (3rd ed.). USA: CRC Press.
- Van Marle, M. E., Van de Ende, D., Kruif, C. G., Mellema, J. (1999). Steady-shear viscosity of stirred yogurts with varying ropiness. *Journal of Rheology*, 43, 1643-1662.

- Vásquez-Villalobos, V., Aredo, V., Velásquez, L., Lázaro, M. (2015). Physicochemical properties and sensory acceptability of goat's milk fruit yogurts with mango and banana using accelerated testing. *Scientia Agropecuaria*, 6, 177-189.
- Vasseur, A. (1960). *La Leche su Producción y Procesos Industriales*. USA: Continental.
- Zhang, L., Folkenberg, D. M., Amigo, J. M., Ipsen, R. (2016). Effect of exopolysaccharide-producing starter cultures and post-fermentation mechanical treatment on textural properties and microstructure of low fat yoghurt. *International Dairy Journal*, 53, 10-19.