



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA  
MEZCLA DE LECHE DE SOJA KEFIRADA CON TOMATE DE  
ÁRBOL”**

**AUTOR: CUZCO PEÑAFIEL ALEJANDRO ANDRÉS**

**DIRECTOR: DELGADO REINALDO**

**SANGOLQUI**

**2017**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

### **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

#### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación. “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA MEZCLA DE LECHE DE SOJA KEFIRADA CON TOMATE DE ÁRBOL” realizado por el señor CUZCO PEÑAFIEL ALEJANDRO ANDRÉS, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor CUZCO PEÑAFIEL ALEJANDRO ANDRÉS su sustentación pública.

Sangolquí, 16 de Mayo de 2017

  
REINALDO DELGADO GARCÍA  
DIRECTOR



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel, con CI. 1724499742, declaro que este trabajo de titulación denominado, “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA MEZCLA DE LECHE DE SOJA KEFIRADA CON TOMATE DE ÁRBOL” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello soy responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 15 de Mayo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel'.

Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel  
CI. 1724499742



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN

Yo, Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación denominado “ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA MEZCLA DE LECHE DE SOJA KEFIRADA CON TOMATE DE ÁRBOL” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 15 de Mayo de 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel".

Alejandro Andrés Cuzco Peñafiel  
CI. 1724499742

## DEDICATORIA

Este trabajo que es el último peldaño de esta hermosa carrera está dedicado a mis padres Mónica y Luis, quienes me han apoyado en cada momento de mi vida y lo seguirán haciendo con su amor y ahínco enseñándome cada día la importancia del respeto, la honestidad, la honradez y la pasión con la que se deben hacer cada cosa en la vida, a mi hermana Carla, a mis abuelos Mimi y Macario, quienes siempre estuvieron pendientes de cada paso que daba.

A Tomas, hijo mío sacrificamos tanto tiempo juntos por alcanzar esta meta, felicidades también es tuya, a Lolo mi madrina que siempre estuvo con sus palabras de aliento y recomendaciones a mi lado.

A Sofy y Xavi por su apoyo durante todos estos años de amistad, que me han sabido brindar valiosos consejos.

A Liga por ser el equipo de mis amores, nunca te voy a dejar de querer.

A mis amigos los cebollitas, ASME y los piratas, más que amigos hermanos

Y por sobre todas las cosas este triunfo también es tuyo Dios padre celestial, gracias infinitas por todas tus bendiciones.

Alejandro Cuzco

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias papi, gracias mami por todo el respaldo brindado durante todos estos años de estudio, a toda mi familia que me brindo su respaldo y ayuda siempre de cualquier manera apoyándome siempre, a mis amigos cebollitas y ASME con los cuales pasamos tantos años juntos en la gloriosa carrera de ingeniería mecánica juntos fuimos fuertes, a los piratas, más que amigos hermanos.

Un agradecimiento especial al Dr. Reinaldo Delgado, y al Dr. Francisco Rubio, (Paco), quienes estuvieron a cargo de la tutela de este proyecto y un dios les pague a todos los sabios maestros quienes supieron llegar a mí con sus conocimientos.

Alejandro Cuzco

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
Índice de Figuras: .....	x
Capítulo 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 General.....	5
1.2.2 Específicos .....	5
1.3 Justificación e importancia.....	5
1.4 Alcance .....	7
Capítulo 2 .....	8
2. Estado del Arte .....	8
2.1 Kéfir.....	8
2.1.1 Origen:.....	9
2.1.2 Descripción del Producto .....	9
2.1.3 Fabricación de Kéfir .....	10

2.2	Leche de soja .....	12
2.2.1	Métodos de Preparación .....	13
2.3	Tomate de Árbol .....	14
2.4	Reología .....	16
2.4.1	Historia .....	16
2.4.1	Campos de aplicación: .....	18
2.5	Fluidos reales, modelos de comportamiento reológico .....	19
2.5.1	Comportamiento viscoso pseudoplástico (Shear thinning) .....	20
2.5.2	Comportamiento viscoso plástico (Shear Thickening) .....	23
2.5.3	Tixotropía .....	24
2.5.4	Reopexia .....	26
2.6	Modelos matemáticos de ajuste .....	27
2.7	Energía de Activación .....	28
Capítulo 3	.....	30
3.	Diseño Experimental y Caracterización Reológica .....	30
3.1	Reometría .....	30
3.1.1	Platos paralelos .....	31
3.1.2	Cono y Plato .....	32
3.1.3	Geometría de Paletas .....	33
3.2	Protocolo de Experimentación: .....	33
3.2.2	Procesos experimentales .....	36
3.3	Proceso Experimental .....	37
3.4	Preparación de las muestras .....	38
3.4.1	Preparación de la muestra de tomate de árbol: .....	39



3.4.2 Preparación de la muestra de leche de soja kefirada: .....	39
Capítulo 4 .....	41
4. Análisis e Interpretación de Resultados.....	41
4.1 Análisis del Estudio Reológico.....	41
4.1.1 Leche de soja.....	41
4.1.2 Pulpa de tomate de árbol .....	43
4.1.3 Leche de soja kefirada .....	44
4.1.4 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 50% .....	45
4.1.5 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 40% .....	45
4.1.5 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 30% .....	46
4.1.6 Análisis de viscosidad en relación a la variación de la temperatura .....	46
4.1.6 Análisis de la respuesta viscoelástica del sistema .....	50
4.2 Medición del pH. ....	52
CAPÍTULO 5.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	54
5.1 CONCLUSIONES .....	54
5.2 RECOMENDACIONES.....	55
Bibliografía.....	56

## Índice de Figuras:

1. Figura 1: a) Gránulos de kéfir reposando en agua, b) fotografía de los gránulos de kéfir.....	6
2. Figura 2: Leche de soja.....	10
3. Figura 3: tomate de árbol (Solanum Betaceum Cau).....	13
4. Figura 4: Viscosidad vs velocidad de corte para diferentes tipos de sustancias.....	19
5. Figura 5: Clasificación de los fluidos con esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento: Pseudoplástico, Bingham y Bingham pseudoplásticos muestran una reducción de la viscosidad aparente con una tasa de cizallamiento creciente.....	20
6. Figura 6: Dependencia de la velocidad de corte en el tipo de fluido y esfuerzo de cizallamiento aplicado.....	22
7. Figura 7: Estructura acumulada después de la cizalla previa monitorizada con ensayos oscilatorios de amplitud a baja deformación.....	23
8. Figura 8: Bucle de histéresis de un material tixotrópico.....	24
9. Figura 9: Comportamientos de la viscosidad con el tiempo.....	25
10. Figura 10: a) fotografía de las geometrías tipo paletas, cono y platos paralelos; b) principales geometrías: platos paralelos, cono plato y cilindro couette.....	29
11. Figura 11: a) Reómetro Discovery TA Instrument HR-2; b) Sistema de refrigeración plato peltier.....	33
12. Figura 12: Estudio de los módulos elásticos y de pérdida de la caracterización reológica de la mezcla del kéfir de leche con tomate de árbol.....	35

13. Figura 13: Curva de flujo estacionario de la leche de soja sola, curva basada en la velocidad de cizalla.....	40
14. Figura 14: Curva de flujo estacionario de la leche de soja a mayor concentración.....	40
15. Figura 15: Curva de flujo estacionario de la pulpa de tomate de árbol.....	41
16. Figura 16: Curva de flujo estacionario de leche de soja kefirada en el rango de velocidad de 0.1 a 3000 [1/s].....	42
17. Figura 17: Curva de flujo estacionario a la combinación de kéfir de leche de soja con pulpa de tomate de árbol al 50%.....	42
18. Figura 18: Curva de flujo estacionario de la mezcla kéfir de leche de soja con tomate de árbol al 40%.....	43
19. Figura 19: Curva de flujo estacionario de la leche de soja kefirada con tomate de árbol al 30%.....	43
20. Figura 20: Curvas de flujo estacionario a 4°C, manteniendo la Temperatura y variando el porcentaje de composición.....	44
21. Figura 21: Curva de flujo estacionario a 10° de temperatura variando la composición porcentual de la mezcla.....	44
22. Figura 22: Curva de flujo estacionario a 20°C, la temperatura se mantiene constante, mientras que el grado de composición varía al 30%, 40% y 50% de contenido de tomate de árbol.....	45
23. Figura 23: Curvas de flujo estacionario de las combinaciones al 30%, 40% y 50% de tomate de árbol, realizadas a 30°C.....	45
24. Figura 24: Módulos elástico y viscoso en función de la amplitud de oscilación. La región de respuesta lineal se reduce al aumentar la frecuencia fija de oscilación.....	49
25. Figura 25: Módulos elástico y viscoso y tangente del ángulo de pérdidas en función de la frecuencia de oscilación.....	50

## Índice de Tablas:

1. Tabla 1: Especificaciones técnicas del reómetro Discovery DHR-2. .... 34
2. Tabla 2: Datos característicos de la geometría tipo cono..... 35
3. Tabla 3: Valores de pH en relación a los tiempos de fermentación..... 53

# RESUMEN

La Reología es la ciencia que estudia la deformación de las sustancias sometidas a esfuerzos. Surgió como consecuencia de la necesidad de explicar el comportamiento viscoso no-lineal de los fluidos. En esta investigación se ha determinado el comportamiento no-Newtoniano de la mezcla leche de soja kefirada/jugo de tomate de árbol, con la finalidad de determinar la textura de un producto que compense la acidez propia del kéfir con el sabor del jugo de tomate, haciéndolo aceptable por parte del consumidor, especialmente de la población infantil. Con ello se pretende aprovechar de forma específica las cualidades nutricionales del kéfir. Se han realizado barridos de velocidad de cizalla obteniéndose una característica disminución de la viscosidad con dicha magnitud. Además se ha realizado un estudio de la respuesta viscoelástica, de la que se dedujo una consistencia de gel, que lo convierte en un producto derivado de la leche de soja potencialmente válido, por sus características texturales, para el consumo humano.

## Palabras Claves:

- **REOLOGÍA**
- **CARACTERIZACIÓN**
- **LECHE DE SOJA**
- **KÉFIR**

## **ABSTRACT**

Rheology is the science that studies the deformation of substances subjected to stress. It arose as a consequence of the need to explain the non-linear viscosity behavior of fluids. In this research the non-Newtonian behavior of the kefirada soy milk / tree tomato juice mixture has been determined, in order to determine the texture of a product that compensates the kefir's own acidity with the taste of tomato juice, Making it acceptable by the consumer, especially the child population. This is intended to take specific advantage of the nutritional qualities of kefir. Shear rate sweeps have been obtained obtaining a characteristic decrease of the viscosity with this magnitude. In addition, a study of the viscoelastic response, from which a gel consistency was deduced, has been made, which makes it a product derived from soy milk that is potentially valid, due to its textural characteristics, for human consumption.

### **Key Words:**

- **RHEOLOGY**
- **TREE TOMATO**
- **KÉFIR**
- **CHARACTERIZATION**

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de leches fermentadas está asociado con múltiples beneficios para la salud tanto en la prevención de enfermedades digestivas como en el fortalecimiento del sistema inmunológico (Gorzek & K., 2000). Existe una gran variedad de leches fermentadas, en su gran mayoría son de producción tradicional y artesanal. (García & Hernández, 2015)

Con el fin de mejorar el sabor del producto se mezcló la leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol, y se realizaron los ensayos reológicos para saber el cambio en su comportamiento comparado con la leche de soja kefirada sola y la leche de vaca combinada con la pulpa de tomate de árbol, a fin de encontrar diferencias en su textura y su comportamiento reológico. Posteriormente para evaluar el nivel de aceptación o rechazo del producto sobre el sabor y la consistencia, se realizó una prueba hedónica de aceptabilidad, la cual se les brindo a sujetos de prueba muestras de las mezclas a diferente porcentaje de concentración del jugo de tomate de árbol.

El estudio fue realizado en el Laboratorio de Reología perteneciente al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".

Por lo relatado anteriormente, en la presente investigación se pretende realizar la caracterización reológica de un producto con efecto probiótico y que

tenga bajo contenido de grasa; por lo que tuvo como objetivo fermentar leche de soja a partir de gránulos de kéfir. Para ello se realizaron algunos estudios reológicos a diferentes temperaturas, medición de pH y variación de densidad. Con los resultados obtenidos se realizó la modelación y el ajuste matemático, siendo el producto final apto para el consumo humano. (García & Hernández, 2015)

### **1.1 Antecedentes**

En la actualidad, la reología se la puede describir como una ciencia novedosa de estudio en el Ecuador, que despierta un interés progresivo tanto desde el punto de vista académico como industrial, al tener un sinnúmero de aplicaciones en el control de calidad, textura, ingeniería de procesos, desarrollo de productos y optimización de formulaciones con un campo de investigación realmente extenso que incluye la industria alimenticia, petrolera, química, medicina, mecánica, entre otras, trabajando en varios temas alrededor del país (Unimedios, 2012)

Hoy por hoy se ha convertido en uno de los criterios y parámetros esenciales en el desarrollo de productos en la industria alimenticia, control de calidad, así como en la caracterización de la textura. Las propiedades reológicas de los distintos alimentos, normalmente tienen gran importancia en el procesado, transporte y almacenamiento (Steffe, 1996). Numerosas investigaciones en reología de alimentos confirman la variedad de comportamientos de flujo encontrados en sistemas alimentarios. (Díaz Ocampo, García Zapateiro, Franco Gómez, & Vallejo Torres, 2012)

A pesar de todas las aplicaciones y bondades que nos ofrece esta ciencia, su estudio e investigación en el Ecuador es muy limitado, mediante esta investigación se pretende alcanzar:



- Caracterización reológica de la mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol
- Establecer la mejor formulación en porcentaje de mezcla, con el fin de obtener la mejor textura del producto final.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Realizar la caracterización reológica de la mezcla leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol

### **1.2.2 Específicos**

**1.2.2.1** Determinar la variación de la textura del kéfir al mezclarla con jugo de tomate de árbol.

**1.2.2.2** Determinar la respuesta viscoelástica de la mezcla leche de soja kefirada tomate de árbol, e interpretarlas mediante gráficas que relacionen las Viscosidades aparente y compleja de la mezcla leche de soja kefirada/tomate de árbol en función de la velocidad de cizalla y de la frecuencia en la región viscoelástica lineal

**1.2.2.3** Evaluar las características sensoriales del producto (aspecto, color, sabor, textura y apariencia)

## **1.3 Justificación e importancia**

Pese a todas las bondades que esta bebida ofrece para la salud humana, y considerando que es una bebida antigua, aún no se ha logrado llegar a producirlo masivamente tanto en nuestro país, como en Sudamérica.

Por tal motivo esta investigación busca caracterizar la mezcla de leche de soja kefirada- tomate de árbol con el fin de motivar a una mayor producción, y convertirla en una bebida de consumo masivo.

Adicionalmente al acudir en busca de información a revistas indexadas, plataformas de publicaciones científicas, artículos académicos, etc., la investigación y el conocimiento acerca de propiedades reológicas del kéfir son escasas, o prácticamente nulas. A partir de esto nace la necesidad de plantear alternativas de estudio por medio de un proyecto de investigación con el objetivo de contribuir con las propiedades reológicas de la leche de soja kefirada expresadas mediante curvas características que a futuro puedan ser utilizadas para el cálculo, diseño y construcción de equipos industriales que nos ayuden con su procesamiento, envase y distribución. (Carrá, Merino, & Marin, 2012)

Las propiedades reológicas de los alimentos han contribuido enormemente en la producción industrial, en el sentido de que se ha podido realizar el cálculo, diseño y construcción de equipos que permitan optimizar recursos y mejorar los procesos industriales, principalmente aquellos en los que se ven involucradas la transferencia de calor. (Herrera, Medina, & Naranjo, 2008)

El presente estudio pretende determinar las propiedades reológicas de la leche de soja kefirada mezclada con jugo de tomate de árbol basándose en fundamentos teóricos y prácticos de la Reología

La investigación se enfoca principalmente en la caracterización de la curva reológica de una preparación bebible de leche de soja y tomate de árbol, realizando una variación en los parámetros de ensayo y preparación del mismo. Las propiedades reológicas son indispensables en el cálculo y diseño de equipos como bombas, intercambiadores de calor, evaporadores, deshidratadores y todos aquellos equipos en que existe flujo o cambio de consistencia. Además son índices actuales de control de calidad. (Hildago, 1997)

En nuestro país la comercialización de este tipo de producto es muy escasa a o nula, ninguna de las principales fábricas de lácteos en el territorio ecuatoriano lo comercializa. Debido a que tanto el kéfir como la leche de soja son

beneficiosos para la salud, en este estudio intentamos producir kéfir de leche de soja.

#### **1.4 Alcance**

El actual proyecto de investigación a ejecutarse en el laboratorio de reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas, tendrá como alcance la caracterización reológica de la mezcla kéfir de leche de soja (leche de soja kefirada) - tomate de árbol, a través de ensayos aplicados a la muestra mediante un reómetro. Obteniendo a través de experimentación resultados con los cuales se construya gráficas que describan e interpreten su comportamiento

## Capítulo 2

### 2. Estado del Arte

En el presente capítulo se presentan conceptos generales sobre fluidos, su clasificación y comportamientos, reología, reometría; así también la descripción de las sustancias usadas para el presente estudio como es el caso de la leche de soja, kéfir y tomate de árbol. Por último se realiza una revisión de los medios por los cuales se realiza el estudio de los fluidos y las principales ecuaciones con las que se podrán analizar los datos obtenidos.

#### 2.1 Kéfir

Kéfir es una bebida artesanal de leche producto de la fermentación láctica como alcohólica debido al accionar de bacterias y levaduras contenidas en sus gránulos (Chandan, Other Fermented Dairy Products, 1982), se caracteriza por la presencia de bióxido de carbono producido por levaduras que la convierten en una bebida levemente gaseosa y espumosa por lo que su sabor y propiedades son únicas. (Tamine & Robinson, 1988).

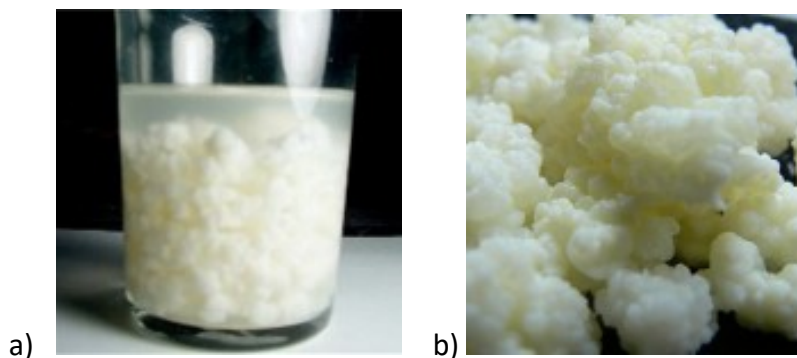


Figura 1: a) Gránulos de kéfir reposando en agua, b) fotografía de los gránulos de kéfir.

### 2.1.1 Origen:

Su origen se remonta históricamente a las montañas Caucásicas de Europa del Este. (Koroleva, 1988), a pesar de aquellos análisis microbianos de muestras de kéfir tomadas de diferentes locaciones alrededor del mundo indican diferencias en la población de microflora.

### 2.1.2 Descripción del Producto

Durante la fermentación, el inóculo utilizado está formado por una simbiosis de microorganismos inmersos en una matriz de polisacáridos compuestos de glucosa y galactosa (Marshall, 1986), 24% de su constitución son carbohidratos y 13% son proteínas (Chandan, 1982) formando masas gelatinosas blanquecinas que pueden ser reutilizadas retirándolos por filtración de la leche fermentada para volver a usarlos en la siguiente producción. (Oberman, 1985)

Además, los ensayos in vitro y en animales han demostrado que el kéfir y sus constituyentes tienen propiedades anti-cancerígenas, antimutagénicas, antivirales y antifúngicas. (IFIS, 2006)

En nuestro país la norma INEN 2395:2011, define al kéfir de la siguiente manera: *“leche fermentada con cultivos ácido lácticos elaborados con granos de kéfir, Lactobacillus kéfir, especies de géneros Leuconostoc, Lactococcus y Acetobacter con producción de ácido láctico, etanol y dióxido de carbono. Los granos de kéfir están constituidos por levaduras fermentadoras de lactosa (Kluyveromyces marxianus) y levaduras no fermentadoras de lactosa (Saccharomyces omnispurus, Saccharomyces cerevisiae y Saccharomyces exiguus), Lactobacillus casei, Bifidobacterium sp y Streptococcus salivarius subs. Thermophilus, por cuales deben ser viables y activos durante la vida útil del producto.”* (INEN, Lechas Fermentadas, Requisitos, 2011)

Cuando los gránulos de kéfir son inmersos en leche (cualquiera que sea), parte de los microorganismos pasan a ella donde se multiplican y producen

metabolitos que otorgarán a la leche fermentada sus características químicas y físicas particulares. Sus características organolépticas, como su composición, están sujetas a variaciones según la región. (Witthuhn, Schoeman, & T.J., 2005). Estas variaciones pueden deberse a factores tales como el origen y almacenamiento de los gránulos de kéfir, el tipo de leche utilizada, así como a las condiciones de elaboración del producto siendo los principales factores a tomar en cuenta la relación gránulo-leche y la temperatura de fermentación (Latorre-García, Del Castillo, & Polaina, 2007)

### **2.1.3 Fabricación de Kéfir**

Comercialmente el kéfir se fabrica a partir de leche de vaca, lo cual es la forma más tradicional de producirlo, ya que también se elabora en algunas partes del mundo a partir de la leche de ovejas, cabras y búfalos. (ISMAIL, EL-NOCKRASHY, & KHORSHID, 1983). La incubación de los granos se realiza a una temperatura entre 22°C y 25°C durante 12 a 16 horas (Vedamuthu, 1982), posterior a ello se separa los gránulos de la leche kefirada y se la deja reposar a 10°C durante uno a tres días, se pasteuriza entre 85°C a 95°C durante 5 a 30 minutos (Hargrove, 1970). Todos esos detalles pueden variar según la concentración de sabor y aroma se requiera.

Al añadir los gránulos de kéfir a la leche comienza su proceso fermentativo y con ello la cinética de crecimiento de los microorganismos en el medio láctico, la producción de ácidos, CO<sub>2</sub>, viscosidad y consumo de lactosa; adicionalmente las levaduras, bacterias ácido lácticas (BAL) y ácido acéticas, (BAA) provenientes del kéfir pasan inmediatamente a la leche, parte de los microorganismos aglutinados a los gránulos de kéfir se desprende y pasan a la fase líquida donde, junto a los microorganismos adheridos al gránulo, comienza la fermentación (Peláez, 2013).

Existen otros métodos de fabricación y producción de kéfir que se revisará a continuación:

### **2.1.3.1 Método Tradicional**

Es realizado mediante la adición de gránulos de kéfir directamente a la leche a temperatura ambiente. En la producción casera, no hay un control rígido sobre la cantidad de leche en relación a la cantidad de kéfir. El producto final no se puede utilizar para inocular nueva leche, más si los gránulos de kéfir que se los puede reutilizar para fermentar otra cantidad nueva de leche. (Farnworth, 2003)

### **2.1.3.2 Producción Industrial**

La producción a gran escala de kéfir es limitada por problemas relacionados con la reproducción de los gránulos de kéfir y por ende con la producción de un producto con adecuada consistencia. Sin embargo, en países de Europa del Este las grandes producciones de kéfir para su comercialización son comunes. En un principio, se utilizó el denominado “método conjunto”, en el cual, la leche inoculada es introducida en botellas, fermentándose a una temperatura controlada hasta formar un producto con mayor consistencia y densidad, para después ser enfriada. Sin embargo, las características de este kéfir eran de baja calidad en comparación con el producto fabricado tradicionalmente.

Actualmente, el kéfir es producido por un método de agitación en que la fermentación, maduración y refrigeración ocurre en un mismo recipiente. Las características generales del producto final dependerá del tipo de leche utilizada, la fuente de los gránulos, la preparación del cultivo lácteo, tiempo de fermentación, la inclusión de una etapa de enfriamiento y maduración. (Farnworth, 2003)

Reportes indican que en inicios de este siglo se ha empezado a cultivar kéfir en leche de soja, realizando leche kefirada. (Mann, 2003)

## 2.2 Leche de soja

La leche de soja es un líquido que proviene del remojo del grano de soya molido en agua caliente o fría, para posteriormente ser prensado y colado. (Crespo & Landines, Diseño de una Planta de Procesamiento de Leche de Soya para la Fundación Hogar de Cristo, 2011)

La norma INEN, lo define como: *“Producto preparado con frijoles de soja secos remojados en agua, transformados en puré que se hierva y se cuele. La bebida de soja puede consumirse como tal o utilizarse para preparar otros productos de soja, como la Película de bebida a base de soja, Cuajada de soja [tofu] semideshidratada y deshidratada [kori tofu]. Incluye además productos de soja, como las bebidas a base de soja en polvo, que se venden como tales, para reconstituirse, o como mezcla que contiene un coagulante que el consumidor puede reconstituir para preparar tofu blando hecho en casa.”* (INEN, NORMA GENERAL DEL CÓDEX PARA LOS ADITIVOS ALIMENTARIOS (MOD), 2013)



Figura 2: Leche de soja.

Fuente: <http://svegetarianos.blogspot.com/>

La soja contiene una serie de anticancerígenos y aminoácidos esenciales (Messina, Persky, Setchell, & Barnes, 1994). Es una alternativa para sustituir las proteínas cárnicas en la dieta diaria reduciendo la concentración de colesterol de lipoproteína total. La leche de soja, obtenida por extracción acuosa



de soja entera, su consumo ha crecido en muchas áreas del mundo (Hauman, 1984). La leche de soja puede proporcionar varios beneficios nutricionales para la salud, al provenir de una fuente vegetal no contiene colesterol o lactosa y sólo pequeñas cantidades de ácidos grasos saturados, por este motivo la leche de soja es ideal para personas que padecen de intolerancia a la lactosa (Murti, Bouillanne, Landon, & Desmazeaud, 1992). Sin embargo, muchas personas encuentran el sabor de la leche de soja indeseable. La leche de soja se caracteriza comúnmente por el sabor de la soja como tal, su sabor que puede mejorarse mediante la fermentación con ácido láctico (GRANATA & Morr, 1996), la sacarosa, rafinosa y estaquiosa son carbohidratos presentes en la leche de soja que sustituyen a la lactosa, estas moléculas serán las encargadas de la fermentación de leche al estar en contacto con el kéfir. (Lui & Lin, 2000)

## **2.2.1 Métodos de Preparación**

Existen algunos métodos de preparación, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

### **2.2.1.1 Método Tradicional**

Es usado mayoritariamente en Asia, en este la soja es remojada en agua durante la noche o con un mínimo de 3 horas. Los granos remojados son molidos a temperatura ambiente, seguido de la eliminación de un residuo insoluble por medio del filtrado de la solución, por lo que el producto final tiene un fuerte sabor y olor a soja. (FAO, 2017) La mezcla resultante se somete a la cocción, por medio del calor se inactiva la enzima inhibidora de la tripsina, además mejora su sabor y pasteuriza el producto. La cocción del producto se realiza por un periodo de 15 a 20 minutos a una temperatura alrededor de los 100°C. Al terminar este proceso se procede a homogenizar, esterilizar y envasar la leche de soja. (Crespo & Landines, 2011)

### **2.2.1.2 Método de Illinois**

Con este método se busca desactivar la enzima lipoxigenasa, el método consiste en remojar la soja en una solución alcalina que tiene un valor de pH. entre 7,5 hasta 8,5 de NaHCO<sub>3</sub> a 0,05% por un tiempo de 2 horas. Posteriormente, se descascarilla la soja remojada, para luego dar paso a la cocción y molienda en agua a temperaturas entre 80°C a 100°C por 30 minutos. El siguiente paso es el filtrado el cual se debe realizar con la malla número 250 (0,04 mm) en el cual se separa la leche de soja y la okara, para finalmente realizar la homogenización, esterilización o pasteurizado y embotellado de la leche de soja. (NELSON, STEINBERG, & WEI, 1976)

### **2.2.1.3 Método de Cornell**

Al igual que el método Illinois busca inactivar la enzima lipoxigenasa con la finalidad evitar la generación del sabor a haba de la soja, en este método el grano de soja se procesa íntegro, el siguiente paso consiste en lavar con abundante agua, para luego calentarlos en agua caliente, al mismo tiempo que se efectúa el calentamiento del producto también se realiza la molienda. Al terminar la cocción del producto se filtra a fin de separar la leche de soja de la okara, por último se homogeniza y envasa el producto final. (VANACOCKA, 2012)

## **2.3 Tomate de Árbol**

La norma INEN 1909 al tomate de árbol de la siguiente manera: *“El fruto es una baya que se encuentra suspendida por un pedúnculo largo, generalmente de forma ovalada, pero en los huertos ecuatorianos, se ha visto frutos ovoides, esféricos trompiformes y piriformes. La epidermis (cáscara) es lisa y brillante, el color varía entre genotipos, desde el verde que es común en todos cuando está inmaduro, a morado cuando el fruto está próximo a la madurez de consumo, tomando tonalidades de amarillo, anaranjado (tomate), rojo y púrpura oscura. La*

*pulpa es de color anaranjado claro o intenso, tiene sabor agridulce típico, algo más dulzón en las líneas neozelandesa” (INEN-1909, 2015)*

En el Ecuador, el cultivo del tomate de árbol es considerado como uno de los más rentables, esto es reconocido por la Universidad Católica de Cuenca. Según el catedrático Segundo Maita, la inversión inicial al adquirir semillas, preparar el suelo, abonos, terreno y otros aspectos oscila entre los USD 8 000 y otros 2 000 para mantenimiento de una hectárea de cultivos. Los ingresos pueden llegar incluso a los USD 20 000 anuales y siempre existe cosecha. (Mendoza, 2011)



Figura 3: tomate de árbol (Solanum Betaceum Cau).  
Fuente: (INEN-1909, 2015)

El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (Iniap) ha considera algunos ecotipos como el anaranjado gigante, morado neocelandés y morado gigante. Las provincias de Tungurahua, Pichincha, Imbabura, Cotopaxi, Chimborazo, Azuay y Loja son las zonas del país donde más se acopló el tomate por su clima frío-templado. Esta fruta (Solanum Betaceum Cau) es originaria de Bolivia, Argentina, Perú, Ecuador y Colombia. Se desarrolla en temperaturas que oscilan entre los 14 y 20 grados y entre los 600 y 3 300 metros sobre el nivel del mar. Dicha fruta se la puede sembrar durante todo el año, adicionalmente, el tomate de árbol es rico en potasio, fibra y tiene vitamina A, B, C y K. Se le atribuye propiedades como reducir el colesterol, útil para las afecciones gripales. El consumo de la fruta fortalece el cerebro y la memoria. Cura migrañas y cefaleas

severas, controla la rinitis y beneficia el sistema circulatorio. Como bebida se prepara en jugos y sirve para reducción de peso. El aceite de esta fruta (rica en vitamina F) es utilizado para tratar enfermedades de la piel, incluso para aminorar las líneas de expresión del rostro. (Mendoza, 2011)

## 2.4 Reología

El término “Reología”, fue impuesto por el profesor Bingham del Lafayette College, Indiana. Significa el estudio de la deformación y flujo de la materia. Esta definición fue aceptada en 1929 al fundarse la Sociedad Americana de Reología. En esa primera reunión se escucharon artículos sobre las propiedades y el comportamiento de materiales tan diferentes como el asfalto, los lubricantes, las pinturas, los plásticos y el caucho, lo que daba una clara idea del alcance del tema y las numerosas disciplinas científicas que podían estar involucradas. (Barnes, Hutton, & Walters, 2005)

### 2.4.1 Historia

Uno de los primeros en hablar acerca de Reología fue Robert Hooke, en su libro “Verdadera teoría de la Elasticidad”, en su libro publicado en 1678. Dicha teoría se resumía en lo siguiente: “Si se dobla la tensión  $\sigma$ , se dobla deformación  $\gamma$ ”. Es decir que la potencia de un muelle es proporcional a la tensión aplicada. (Doraiswamy, 2002)

En 1687, Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado simple de cizalla (o corte): “*La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él*”. Esta necesidad de deslizamiento es lo que ahora se denomina “Viscosidad”, sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir. La fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como  $F/A$  y se denota como “ $\sigma$ ” (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de

velocidad ( $dv/dy$ ), o también denominado como  $\gamma$  . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad. (LACOMET, 2017)

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Ec. 1}$$

Tres siglos atrás los estudios reológicos eran limitados a aplicar la Ley de Newton para líquidos y la Ley de Hooke para sólidos. Fue a partir del siglo XIX cuando la comunidad científica comenzó a tener dudas acerca de la validez universal de estas leyes lineales. (Cajamarca & Gonzalez, 2011)

En 1835 W. Weber llevó a cabo una serie de experimentos con gusanos de seda y vio que no eran perfectamente elásticos, al observar que una carga longitudinal producía una extensión inmediata, seguida de un posterior alargamiento con el tiempo. Al eliminar la carga inmediatamente se contraía, seguida de una contracción gradual hasta alcanzar su longitud inicial. Estas características se asocian a la respuesta de un líquido. (Domínguez, 2011)

En 1867 J.C Maxwell, en su artículo “Sobre la teoría dinámica de los gases”, propuso un modelo matemático para describir los fluidos que poseen propiedades elásticas, es decir, elementos asociados a la respuesta de un sólido. (González, 2009)

Tanto la conducta que observó Weber en los hilos de seda (sólido) como Maxwell en líquidos se denominó posteriormente “Viscoelasticidad”. Después de Maxwell no existieron estudios más profundos hasta alrededor de 1920, apareciendo una serie de modelos lineales (flujo plástico y punto de fluidez) y no lineales de comportamiento. (López & Pinto, 2011)

Hoy en día, el alcance de la reología y su involucramiento sobre otras ingenierías y ciencias aplicadas es aún más amplio. Se han hecho significativos avances en la biología, en la reología polimérica, reología de suspensiones, en

las industrias de procesamiento químico, alimentos, etc. En la actualidad hay Sociedades Nacionales de Reología en muchos países. (Monsalve, 2010)

La definición de reología ya dada permitiría un estudio de la conducta de toda la materia, incluyendo los extremos clásicos de los sólidos elásticos de Hooke y los líquidos viscosos newtonianos. Sin embargo, estos extremos clásicos están fuera del alcance de la reología. Así, por ejemplo, la mecánica de fluidos newtoniana basada en las ecuaciones de Navier-Stokes no se considera como una rama de la reología y tampoco está entre estos extremos clásicos, tanto los hilos de seda de Weber como los fluidos elásticos de Maxwell.

#### **2.4.1 Campos de aplicación:**

Los campos de la aplicación de la reología tanto en la ingeniería mecánica como en otras ciencias son realmente amplios, vale la pena destacar los siguientes:

- Ingeniería de Procesos, cálculo para el uso e instalación de: Bombas, extrusores, mezcladores, homogeneizadores, intercambiadores de calor, tuberías, etc.
- Formulación para el mejoramiento o desarrollo de nuevos productos.
- Control de calidad antes, durante y al finalizar la producción. Es determinante para la aceptación de productos como snacks, cereales, quesos, aperitivos, yogures, dulces, chocolates, cremas, etc.
- Evaluación de la textura y consistencia de alimentos mediante la correlación con datos sensoriales. Dichas propiedades son importantes a la hora de que un producto sea del agrado del consumidor.
- Producción de pegamentos: estudio de su plasticidad, tiempo de secado, su fluidez dentro del recipiente que lo contiene y al momento de ser empleado
- Producción de pinturas: para su fácil y uniforme esparcimiento sin que se escurra.

- Producción de productos cosméticos y de higiene corporal: la duración de una laca sobre el pelo, la distribución de la pasta de dientes por toda la boca, la forma de cómo se esparce una crema, etc. Todas estas características se estudian con la Reología para obtener la mayor eficacia del producto.
- Producción de medicamentos: se estudia su estabilidad química, su tiempo de caducidad y su facilidad de extrusión, entre otras.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura), y de cristales líquidos.
- Control de sustancias que sean transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico (para evitar que su viscosidad aumente por su movimiento constante.)

## **2.5 Fluidos reales, modelos de comportamiento reológico**

Los fluidos reales siempre experimentan al moverse ciertos efectos debidos a fuerzas de rozamiento o fuerzas viscosas (Kane & Sterheim, 2007). Así, la viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas de un fluido. En los líquidos, esta fuerza de fricción surge de las fuerzas de cohesión entre las moléculas de la sustancia. La viscosidad en los líquidos disminuye con la temperatura, mientras que lo contrario sucede con los gases. (Vite, 2014). Si la viscosidad de un fluido fuera nula, se desplazaría o fluiría por un tubo horizontal sin necesidad de aplicar ningún tipo de fuerza y su cantidad de movimiento sería constante. En un fluido real, esta situación no se mantiene y para conservar un caudal para su transporte o movimiento, en un fluido estable deberá existir y mantenerse una diferencia de presiones entre los extremos de la tubería.

Es necesaria que exista una diferencia de presión debido a la fuerza de arrastre o de frenado, llamadas también fuerzas viscosas, las cuales ejerce el tubo sobre la capa de fluido en contacto con él y a la que ejerce cada capa de fluido

sobre la adyacente que se está moviendo con distinta velocidad. Con ello, la velocidad del fluido variará a lo largo del diámetro de la tubería siendo menor su velocidad en relación a la menor distancia o contacto con las paredes de la misma

El tipo de respuesta que entrega un líquido a una tensión de entrada es el eje de las pruebas reológicas. Hay muchos tipos de fluidos: sustancias puras, mezclas, dispersiones y soluciones, que se los puede agrupar en dos categorías: fluidos simples o estructurados. Cada uno tiene su propio comportamiento cuando está sometido a algún tipo de esfuerzo. En general, cuando un material tiene una fase uniforme, tal como una solución o sustancia pura, se denomina fluido simple. Los materiales que contienen más de una fase, tales como partículas sólidas dispersadas en un líquido, partículas de gas en espuma o una emulsión de líquidos inmiscibles se consideran fluidos estructurados, ya que su comportamiento reológico está sujeto en general a las interacciones de sus componentes. (FRANK, 2016)

Muchos factores afectan la estabilidad de la estructura de un fluido. La viscosidad de la fase líquida en dispersiones juega usualmente un papel importante en las propiedades de flujo del material. Las dispersiones tienen amplias variaciones en su comportamiento el cual dependerá del tamaño de partícula, forma, concentración y cualquier atracción con la fase continua en la que están suspendidas. Si existiese una fuerza electrostática o estéril repulsiva entre las partículas, no terminarían de asentarse rápidamente, formando en cambio una estructura de red que estabilizará la suspensión si no se altera. El cizallamiento o incluso el movimiento browniano pueden destruir esta delicada estructura y descomponer la viscosidad de los fluidos

### **2.5.1 Comportamiento viscoso pseudoplástico (Shear thinning)**

Se lo conoce en el ámbito de la reología como comportamiento “Shear thinning”, donde los fluidos que se comportan de esta manera manifiestan que a medida que el esfuerzo de cizallamiento va incrementando su velocidad de corte disminuye (Mezger T. G., 2006). Su interpretación gráfica demuestra una curva



de su comportamiento con un perfil convexo el cual tiene una tangente o pendiente que va decreciendo con el incremento de la velocidad de corte. La razón de esto es por su viscosidad que a medida que la velocidad de corte aumenta esta va disminuyendo. Este fenómeno puede ser explicado por una deformación en su estructura molecular, dicha estructura, en la mayoría de ocasiones retomará su estado de viscosidad inicial, en el momento que se deja de aplicar la fuerza de cizallamiento. Su índice de comportamiento es menor a la unidad ( $n < 1$ ). (Heldman & Singh, 2013)

Algunos materiales no tienen un límite de elasticidad, sin embargo su comportamiento es no lineal. Fluyen instantáneamente tras la aplicación de estrés, pero también muestran un comportamiento de reducción del cizallamiento. (FRANK, 2016)

Bajo este tipo de comportamiento no se observa generalmente a líquidos puros de baja masa molecular o en soluciones ideales de moléculas pequeñas como sacarosa o cloruro de sodio, la mayoría de ellos son soluciones de polímeros y polímeros fundidos y suspensiones complejas como salsa de tomate, Sangre, pintura y esmalte de uñas, masa de pan, cosméticos, en la siguiente figura se puede ver respresentados algunos comportamientos de diferentes fluidos. (Tazraei, Riasi, & Takabi, 2015)

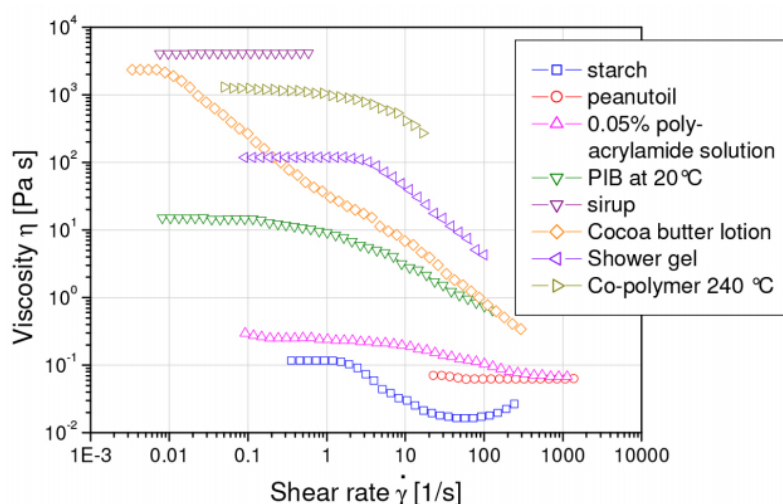


Figura 4: Viscosidad vs velocidad de corte para diferentes tipos de sustancias, Fuente: (FRANK, 2016)

Existe la discusión al considerar algunos investigadores que esta clase de comportamiento pseudoplástico es un caso especial de comportamiento tixotrópico, ya que la recuperación de la microestructura del líquido en su estado inicial requerirá siempre de un lapso de tiempo. Sin embargo, cuando la recuperación de la viscosidad después de la perturbación es muy rápida, el comportamiento observado es el comportamiento shear thinning clásico o pseudoplástico, porque tan pronto como se elimina el cizallamiento, la viscosidad vuelve a la normalidad. Cuando se necesita un tiempo medible para que la viscosidad se recupere, se observa un comportamiento tixotrópico (Barnes H. A., 1997).

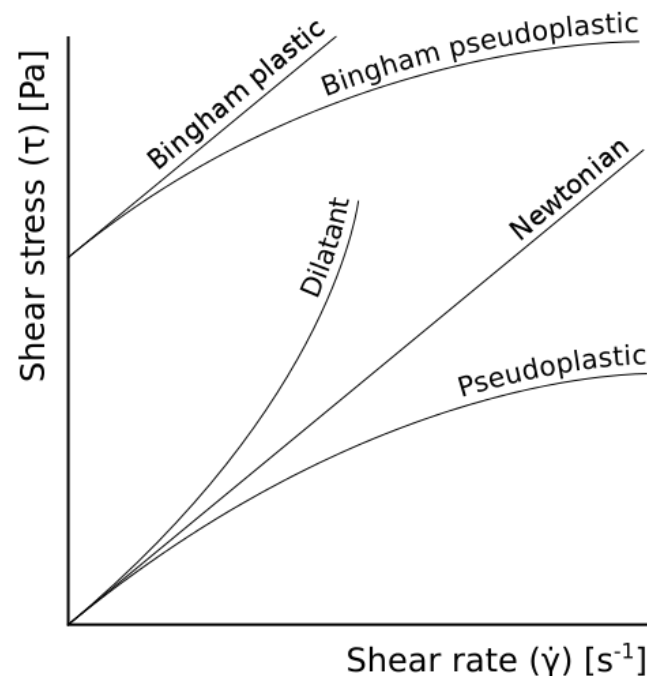


Figura 5: Clasificación de los fluidos con esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento: Pseudoplástico, Bingham y Bingham pseudoplásticos muestran una reducción de la viscosidad aparente con una tasa de cizallamiento creciente.

Fuente: (RUA, 2008)

### 2.5.2 Comportamiento viscoso plástico (Shear Thickening)

El comportamiento visco-plástico, también conocido como “shear thickening” o dilatancia, es un inusual fenómeno por el cual los materiales aumentan realmente su viscosidad al ser agitados o sometidos a algún tipo de esfuerzo. En algunos casos se trata de espesas suspensiones de partículas sólidas en un medio fluido, y que al momento que el fluido es agitado o sometido a alguna clase de esfuerzo tienden sus partículas a espaciarse más. Se puede apreciar esta clase de comportamiento en arenas movedizas, arena de playa húmeda y ciertos productos farmacéuticos como una suspensión de penicilina. Esta clase de comportamiento también denominado como “espesamiento por cizallamiento” es el resultado de la inestabilidad del material y de los reordenamientos de la estructura o separación de fases.

El comportamiento “shear thickening” se produce cuando una suspensión coloidal transita de un estado estable a un estado de floculación. Una gran parte de las propiedades de estos sistemas se deben a la química superficial de las partículas en dispersión, conocidas como coloides. Esto se puede ver fácilmente con una mezcla de almidón de maíz y agua (maicena), que actúa de manera contraintuitiva cuando se golpea o se lanza contra una superficie. La arena que está completamente remojada con agua también se comporta como un material dilatante. (Coleman & Painter, 1997)

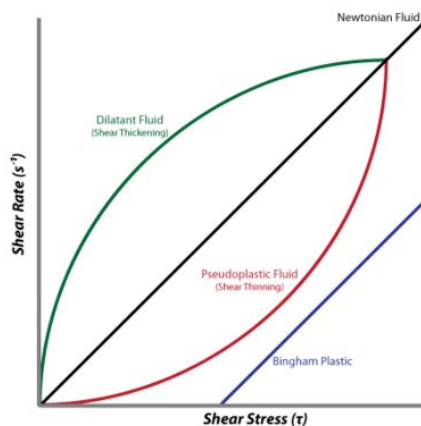


Figura 6: Dependencia de la velocidad de corte en el tipo de fluido y esfuerzo de cizallamiento aplicado.

Fuente: (RUA, 2008)

Los parámetros que controlan esta clase de comportamiento son: tamaño, distribución de tamaño, fracción de volumen, forma de partícula, interacción partícula-partícula, viscosidad de fase continua y tipo, velocidad y tiempo de deformación. Además de estos parámetros, todos los fluidos shear thickening son suspensiones estabilizadas y tienen una fracción de volumen de sólido que es relativamente alta. (Galindo, Rubio, & Velázquez, 2009)

### **2.5.3 Tixotropía**

La tixotropía puede definirse como la disminución de la viscosidad aparente con el tiempo bajo alguna clase de esfuerzo. Este comportamiento parece haber sido formalmente nombrado por Freundlich basado en su trabajo sobre suspensiones. Las primeras referencias acerca de tixotropía son las de Von Kuhne en 1863, durante su observación del movimiento leve de un nematodo a través de una célula muscular sin ningún esfuerzo aparente. (Barnes H. A., 1997)

La tixotropía es una propiedad de adelgazamiento por cizalla dependiente del tiempo. Determinados geles o fluidos que son espesos o viscosos, en condiciones estáticas fluirán (se harán más delgados, menos viscosos) con el tiempo, cuando se agitan, se someten a alguna clase de esfuerzo o se tensionan de otro modo (viscosidad dependiente del tiempo) (Banfill, 2006). Posterior a ello, toman un tiempo fijo para volver a un estado más viscoso. Un fluido tixotrópico es un fluido que toma un tiempo finito para alcanzar la viscosidad de equilibrio cuando se introduce en un cambio brusco en la velocidad de cizallamiento. Algunos fluidos tixotrópicos vuelven a un estado de gel casi instantáneamente, como la salsa de tomate. Otros como el yogur toman mucho más tiempo y pueden llegar a ser casi sólidos. Muchos geles y coloides son materiales tixotrópicos, que muestran una forma estable en reposo pero que se vuelven fluidos cuando se agitan. (Roussel, Understanding the rheology of concrete, 2011)

Para la mayoría de fluidos, la viscosidad es mayoritariamente independiente del tiempo, y sólo es una función de la velocidad de cizalla y la temperatura. En algunas dispersiones concentradas su viscosidad no se estabiliza alcanzando un valor constante durante algún tiempo tras la aplicación del esfuerzo, o velocidad de cizalla. Este estado estacionario depende de la estabilización de las estructuras internas que lo conforman y que pueden descomponerse mediante cizalla, requieren tiempo para reconstruirse. (FRANK, 2016)

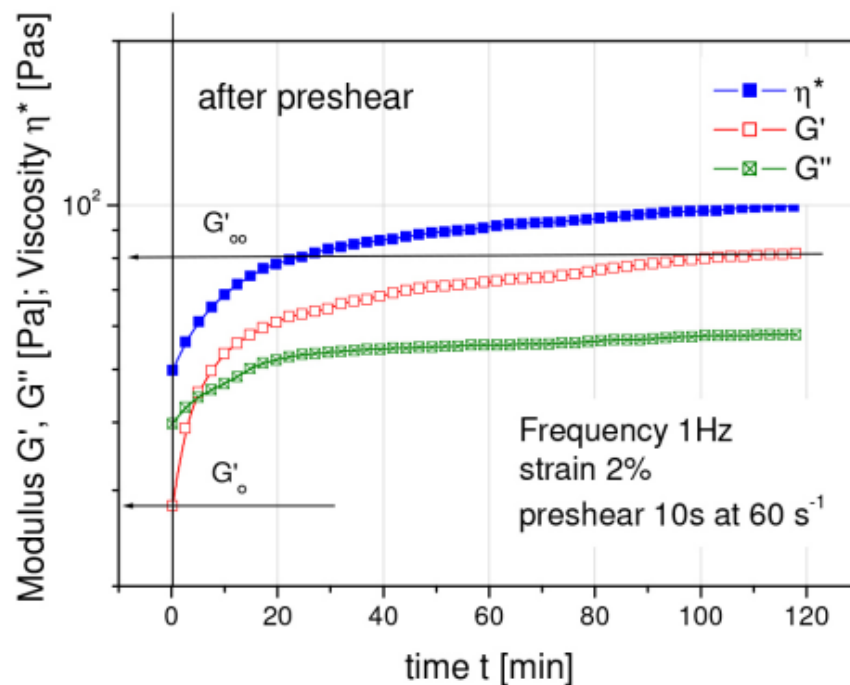


Figura 7: Estructura acumulada después de la cizalla previa monitorizada con ensayos oscilatorios de amplitud a baja deformación.

Fuente: (FRANK, 2016)

Se alcanza una meseta de estado estacionario en viscosidad si se ha establecido un equilibrio entre la descomposición de la estructura y su reconstrucción. Al mermar la velocidad de cizallamiento que provocó la ruptura, el material reformula su estructura interna y la viscosidad se recupera (Figura 7).

La viscosidad de los materiales tixotrópicos no es la misma al momento de ser cizallada que en la recuperación de su estructura. En la mayoría de los casos, cuando la velocidad de cizalla es retardada, la trayectoria de tensión se retrasa formando un bucle de histéresis, que entonces retorna a un punto más bajo que la tensión de cizalla crítica inicial. El área dentro del bucle de histéresis representa la energía consumida en el corte de la estructura.

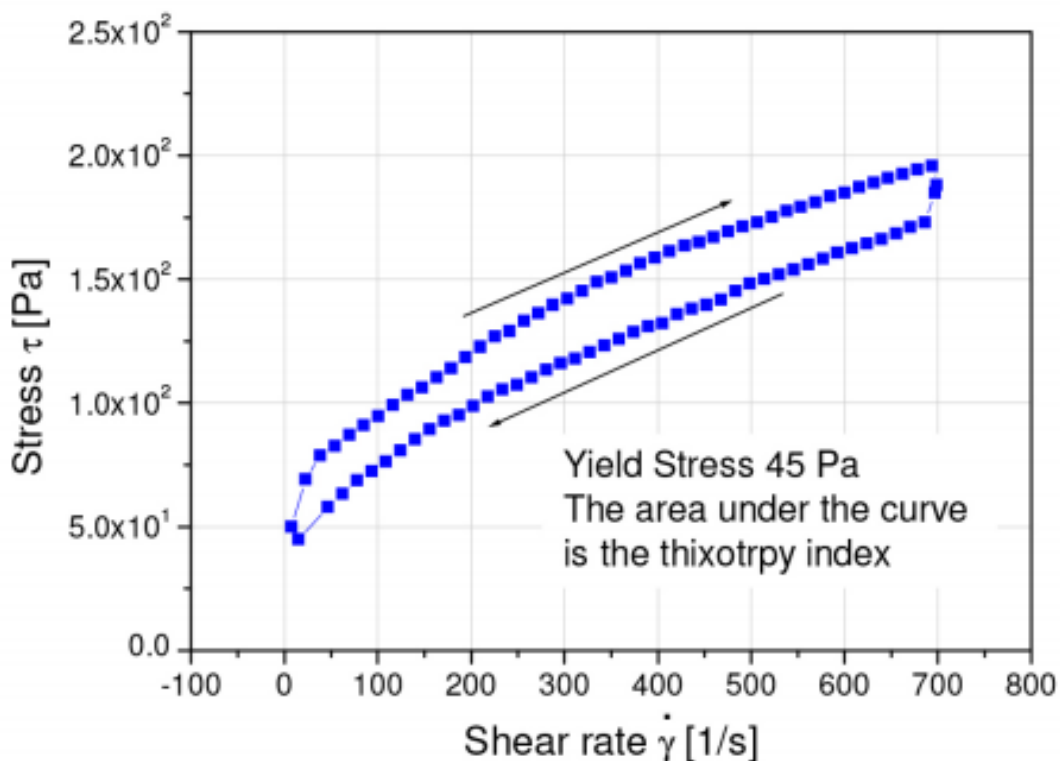


Figura 8: Bucle de histéresis de un material tixotrópico.  
Fuente: (FRANK, 2016)

#### 2.5.4 Reopexia

La viscosidad de un fluido reopéctico aumenta bajo la acción de cizalla. Un líquido reopéctico, tal como una suspensión densa de partículas de látex o plastisoles, se gelificará cuando se agite. Si se les permite descansar, un fluido reopéctico volverá a su menor viscosidad inicial. La curva de viscosidad-

velocidad de cizallamiento forma un bucle de histéresis y la histéresis puede repetirse indefinidamente. (Irgens, 2014)

En este comportamiento reopéctico se puede confundir entre un comportamiento real y aparente. Los fluidos que cambian física o químicamente (gelificación, evaporación del disolvente) mientras están expuestos a una especie de cizalla también experimentan un aumento de la viscosidad. Al ser estos cambios no reversibles, no se puede evidenciar esta clase de comportamiento. (Barnes, Hutton, & Walters, 2005)

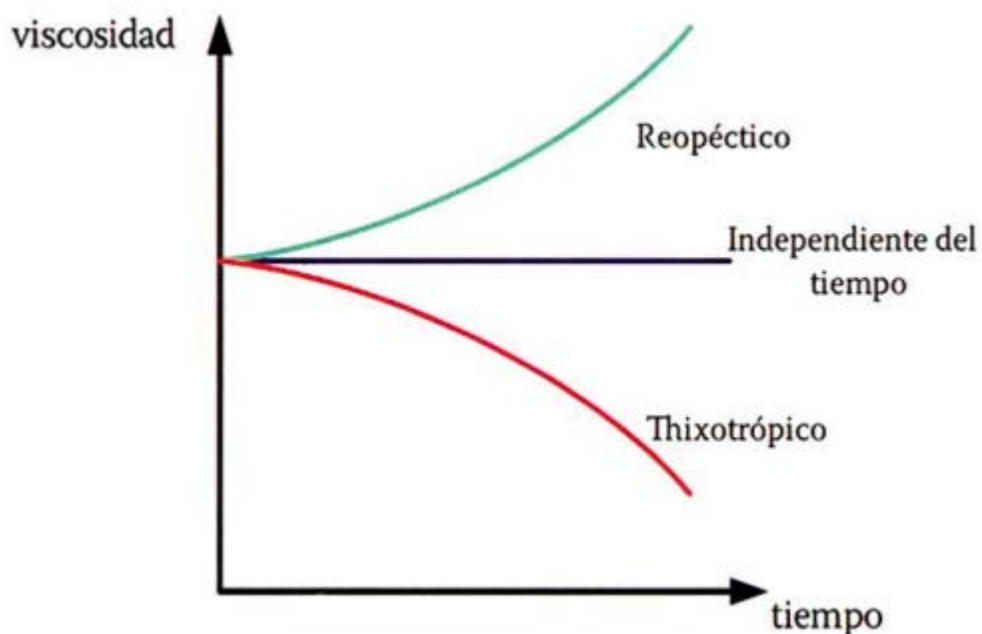


Figura 9: Comportamientos de la viscosidad con el tiempo.

Fuente: (FRANK, 2016)

## 2.6 Modelos matemáticos de ajuste

Existen algunos modelos matemáticos, o ecuaciones en los cuales se enmarcan o se ajustan los comportamientos de los fluidos o sustancias que se puedan llegar a estudiar. Ecuaciones con las cuales los datos experimentales pueden enmarcarse de alguna manera. Se puede enlistar las siguientes:

<b>Ley de Potencia</b>	$\eta(\dot{\gamma}) = K(\dot{\gamma})^{n-1}$	Para $\eta \ll \eta_0$ y $\eta \gg \eta \gg \eta_\infty$
<b>Modelos de Cross</b>	$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = (K(\dot{\gamma}))^m$	
<b>Modelo de Carreau</b>	$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = \frac{1}{(1 + (K(\dot{\gamma})^2)^{\frac{m_1}{2}})}$	
<b>Modelo de Sisko</b>	$\eta = \eta_\infty + K(\dot{\gamma})^{n-1}$	Para $\eta \ll \eta_0$
<b>Modelo de Williamson</b>	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (K\dot{\gamma})^{m_2}}$	Para $\eta \gg \eta_\infty$

Algunos modelos matemáticos también pueden ser ajustados al comportamiento de fluidos viscoplásticos, tixotrópicos, como son los siguientes casos:

<b>Bingham</b>	$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma})$
<b>Herschel- Bulkley</b>	$\tau = \tau_0 + A(\dot{\gamma})^B$
<b>Robertson- Stiff</b>	$\tau = A(\dot{\gamma} + B)^C$
<b>Bingham Modificado</b>	$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma}) + B\dot{\gamma}^2$
<b>Casson</b>	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta(\dot{\gamma})}$
<b>De Kee</b>	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}e^{-A\dot{\gamma}}$
<b>Yahia y Khayat</b>	$\tau = \tau_0 + 2\sqrt{\tau_0\eta\dot{\gamma}e^{-A\dot{\gamma}}}$
<b>Von Berg</b>	$\tau = \tau_0 + A \sinh^{-1}(B\dot{\gamma})$

Donde A, B y C son constantes, las cuales en algunos casos incluyen parámetros del material (Mezger T. , 2006)

## 2.7 Energía de Activación

Durante la producción, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización y consumo de alimentos líquidos, se registran diferentes



temperaturas; es por ello que sus propiedades reológicas se estudian en función de la temperatura. (Rao, 2005).

En general, el efecto de la temperatura sobre la viscosidad ( $\eta$ ) o la viscosidad aparente determinada a una velocidad de cizallamiento específica puede expresarse mediante la relación de Arrhenius:

$$\eta_{\alpha} = \eta_{\infty} \frac{E_{\alpha}}{RT} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $E_a$  es la energía de activación expresada en [kJ g mol], R es la constante de los gases (8,314 [J/mol\*K]), (T) es la temperatura absoluta y ( $\eta_{\infty}$ ) es una contante del factor de frecuencia. (Gutiérrez, 2013).

Para los fluidos no newtonianos, además de la viscosidad aparente a una velocidad de cizalla específica, se puede emplear el índice de consistencia del modelo de ley de potencia  $\sigma = K\dot{\gamma}^n$  para determinar el efecto de la temperatura (Harper & El Sahrighi, 1965).

Las magnitudes de la energía de activación son levemente mayores cuando se emplearon temperaturas relativamente bajas (-15 ° C a 40 ° C). (Rao, 2005).

## Capítulo 3

En el presente capítulo se abarca todos los procesos de experimentación utilizados en la caracterización reológica, métodos y herramientas utilizadas, variación porcentual de composiciones de mezclas, todo ello con el fin de obtener la mayor cantidad de datos experimentales para el análisis de su textura y consistencia del producto final.

### 3. Diseño Experimental y Caracterización Reológica

#### 3.1 Reometría

La reometría (del griego rheos) parte de la reología que describe tanto los métodos de medida como los instrumentos o medios por los cuales se obtengan datos reológicos de un material. Determina las relaciones cuantitativas y cualitativas entre la deformación y la tensión mecánica y sus derivadas. (Macosko, 1994)

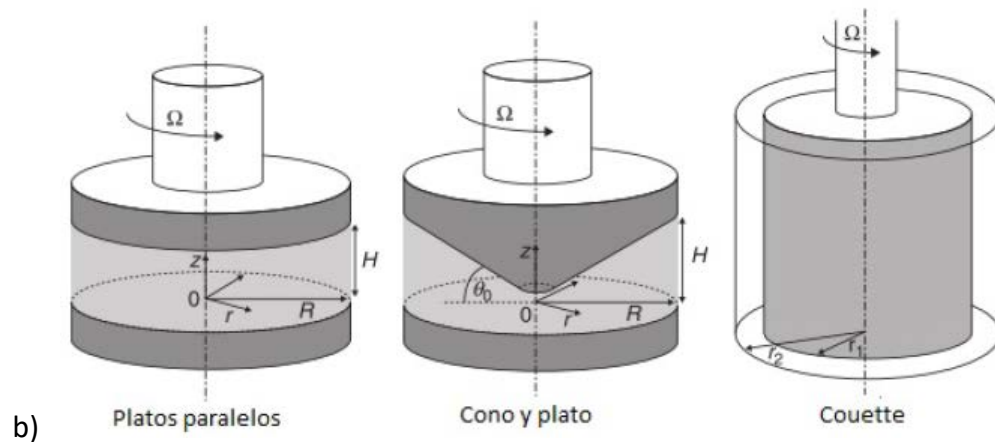
El principal objetivo de la Reometría es caracterizar la dependencia del esfuerzo de corte " $\tau$ ", la deformación posterior a la cizalla, en un flujo cortante simple. En la práctica lo descrito anteriormente se ejecuta confinando una muestra de sustancia o material a ensayar entre dos placas separadas una distancia H, denominada "gap", imponiendo una velocidad relativa entre ambas superficies de las placas.

Existen algunos tipos de geometrías que permiten ensayar los diferentes tipos de comportamiento y consistencia de fluidos a ser analizados, vale destacar tres tipos de geometrías acotadas a continuación:

- Platos paralelos
- Cono y plato
- Couette



a)



b)

Figura 10: a) fotografía de las geometrías tipo paletas, cono y platos paralelos; b) principales geometrías: platos paralelos, cono plato y cilindro couette.

Fuente: (Roussel, 2011)

### 3.1.1 Platos paralelos

En esta geometría la muestra es colocada sobre el plato inferior que es fijo y a la vez es el encargado de refrigerar o mantener la temperatura de la muestra

a conveniencia del usuario. Sobre él, cizalla el plato superior con una velocidad rotacional, producto de aquello se obtiene un torque. (Macosko, 1994)

Como en todos los tipos de geometrías, existen errores que se introducen en la medición y toma de datos, que son corregidas por medio del software interno del reómetro, a pesar de ello, esta clase de geometrías tiene algunas ventajas:

- Fácil limpieza en el momento de la carga y descarga de muestras viscosas y sólidos suaves.
- Existe la facilidad de variar el gap, acorde a la sustancia en análisis y experimentación.
- Ideal para suspensiones con partículas de tamaño máximo a  $200\mu m$ .

Habría que tener cuidado con fluidos con esfuerzo de fluencia a bajas tasas de cizalla, podría encontrarse un efecto cortante por la distribución heterogénea de la mezcla. (Macosko, 1994) (Roussel, 2011)

### 3.1.2 Cono y Plato

En esta clase de geometría el material se coloca entre el cono y el plato de prueba, el cual controla su temperatura mediante el sistema Peltier, esta geometría tipo cono tiene su punta truncada para evitar una mayor fricción, es recomendada usarla al experimentar con suspensiones cuyos tamaños de elementos sean del orden de los micrones (Roussel, 2011). Esta geometría es la más utilizada para la experimentación y estudio de fluidos no newtonianos (Macosko, 1994), las principales aplicaciones son:

- Geometría más usada para la medición de esfuerzos normales
- Análisis de Viscoelasticidad no- lineal
- Útil para sustancias con alta viscosidad, limitada para sustancias de baja viscosidad.

El reómetro que se use será el encargado mediante software de las correcciones de efectos inerciales, flujos secundarios, torque, correcciones térmicas, que podrían afectar a los datos arrojados productos de la experimentación.

Hay que tener especial cuidado en el análisis de materiales o sustancias tixotrópicas, puesto que en la fluencia podría presentarse solidificaciones en las cercanías al plato arrojando valores erróneos de medida. (Roussel, 2011)

### **3.1.3 Geometría de Paletas**

Suspensiones o sustancias con alta densidad o concentración son estudiadas con este tipo de geometrías. Esta geometría consiste en un eje con 4 o 6 paletas. El uso de la misma tiene las siguientes ventajas:

- La experimentación con este tipo de geometría permite el estudio de materiales con mínima perturbación en sus propiedades durante la inserción de la geometría
- Evita el deslizamiento en las paredes del cilindro, ya que la cizalla es realizada por el mismo material confinado entre las paletas y las paredes del cilindro. (Macosko, 1994)

## **3.2 Protocolo de Experimentación:**

Es necesario establecer un protocolo de pruebas y experimentación, al repetir los pasos y los procedimientos establecidos en este protocolo se asegura la fiabilidad de los resultados y la seriedad de los mismos.

### **3.2.1 Equipo experimental:**

El equipo a ser utilizado será un reómetro marca T&A INSTRUMENT, HR-2 Discovery, el cual tiene control de deformación, tasa de cizalla y esfuerzo, este equipo trabaja a 2 [bares] de aire a presión y un sistema de refrigeración Peltier con control de temperatura. Las especificaciones exactas del equipo se las puede apreciar de mejor manera en la siguiente tabla.

Tabla 1  
Especificaciones técnicas del reómetro Discovery DHR-2.

<b>Especificaciones</b>	<b>HR-2</b>
Tipo de cojinete de empuje	Magnético
Tipo de cojinete radial	Carbón poroso
Diseño del motor	Drag Cup
Torque mínimo de oscilación [nN.m]	2
Torque mínimo de cizalla constante [nN.m]	10
Torque Máximo [mN.m]	200
Apreciación de Torque [nN.m]	0.1
Frecuencia Mínima [Hz]	1.00E-07
Frecuencia [Hz]	100
Velocidad angular mínima [rad/s]	0
Velocidad angular máxima [rad/s]	300
Transductor de desplazamiento	Codificador óptico
Apreciación de desplazamiento [nrad]	10
Paso de tiempo en trabajo [ms]	15
Paso de tiempo en espera [ms]	5
Transductor de fuerza normal/ axial	FRT
Fuerza máxima normal [N]	50
Sensibilidad mínima de fuerza normal [N]	0.005
Apreciación de la fuerza normal [N]	0.5
1] Cero en modo de tensión controlada. El modo de velocidad controlada depende de la duración del punto que se está midiendo y del tiempo de muestreo.	
[2] Resultados al 99% del valor comandado	

Fuente: T&A INSTRUMENT

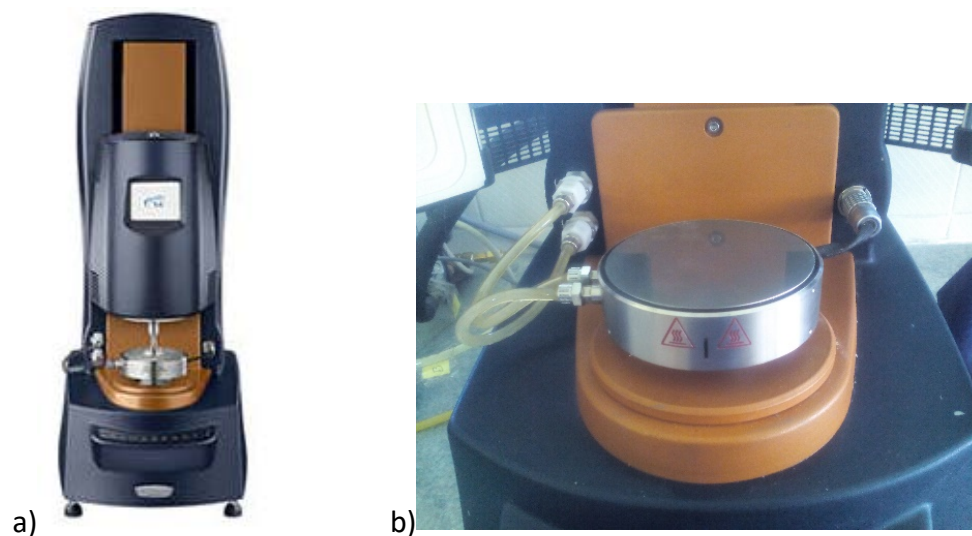


Figura 11: a) Reómetro Discovery TA Instrument HR-2; b) Sistema de refrigeración plato peltier.

Fuente: TA Instrument

La geometría electa para ser la parte experimental es tipo cono- plato, la cual tiene las siguientes características:

Tabla 2

Datos característicos de la geometría tipo cono.

<b>Diámetro</b>	40 [mm]
<b>Ángulo de cono</b>	2°, 01", 05'
<b>Altura de cizalla</b>	66,0 [μm]
<b>Altura de limpieza de muestra</b>	75,0 [μm]
<b>Material</b>	Aluminio
<b>Sistema de refrigeración</b>	Plato Peltier
<b>Vol. Mín. de muestra</b>	0,594 [mL]
<b>Coefficiente de expansión de la geometría</b>	0,435 [μm/°C]

Fuente: T&A INSTRUMENT

## **3.2.2 Procesos experimentales**

### **3.2.2.1 Curva de Flujo estacionario**

La curva de flujo estacionario iniciará desde el mayor valor de cizalla hacia un valor mínimo, al ser un fluido de baja densidad y viscosidad, se realizarán los ensayos para las curvas de flujo estacionario variando el esfuerzo y no la velocidad con el fin de lograr valores de viscosidad a bajas velocidades. (Rubio, Velázquez, & Ordóñez, 2013)

### **3.2.2.2 Barrido de Amplitud**

Se lo utiliza para identificar el dominio viscoelástico lineal y la deformación crítica. Se realiza mediante oscilaciones crecientes de  $\gamma_0$  a fin de observar una deformación crítica donde se pueda observar que  $G'$  es constante. (Banfill, 2006)

### **3.2.2.3 Barrido de Frecuencia**

Los barridos de frecuencia se realizan a temperatura constante, ensayo que normalmente empleada para la caracterización reológica de materiales. Teniendo en cuenta el principio de equivalencia entre tiempo- frecuencia- temperatura (Barnes H. , 2000)

Se determinarán los barridos de frecuencia a distintas temperaturas (en este caso serán las temperaturas representativas del consumo que se establecerán más adelante), y se intentan superponer todas las curvas obtenidas multiplicando la frecuencia por un factor  $a_T$  y corrigiendo cada uno de los módulos con el factor conveniente hasta que alcancen a una de ellas, que se ha elegido como temperatura de referencia. La curva obtenida finalmente se suele emplear para la caracterización de la sustancia ensayada, y se suele denominar curva maestra.

En los experimentos de tipo oscilatorio los efectos elásticos se encuentran en fase con la deformación, mientras que los efectos viscosos están en fase con la tasa de cizalla, para la definición del módulo elástico o de almacenamiento  $G'$  y el módulo viscoso o de pérdida  $G''$ , mediante la siguiente ecuación:



$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t)$$

La respuesta esperada será:

$$\tau(t) = G'(\gamma_0 \sin \omega t) + G''(\gamma_0 \cos \omega t)$$

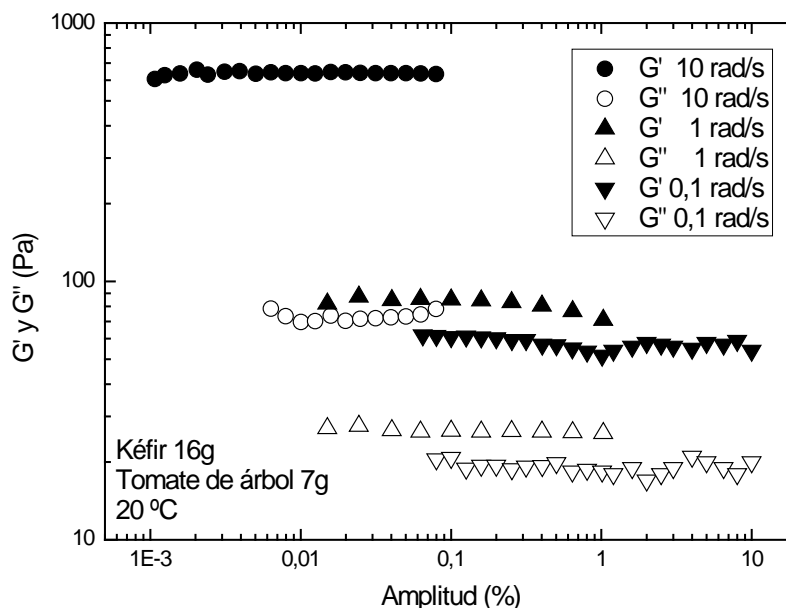


Figura 12: Estudio de los módulos elásticos y de pérdida de la caracterización reológica de la mezcla del kéfir de leche con tomate de árbol, donde se evidencia los módulos elástico (símbolos llenos) y viscoso (símbolos vacíos) en función de la amplitud de oscilación. La región de respuesta lineal se reduce al aumentar la frecuencia fija de oscilación.

Fuente: (Rubio, Ramírez, Cuzco, & Delgado, 2015)

### 3.3 Proceso Experimental

La secuencia experimental iniciará con las curvas de flujo estacionario (esfuerzo vs. velocidad) del jugo de fruta solo, la muestra será preparada siempre de igual forma para todos los ensayos.

Posterior a ellos se realizará el análisis de la leche de soja sola, kéfir solo y leche de soja kefirada; por último en la primera fase de experimentación se realizarán curvas de flujo estacionario a las mezclas entre jugo de tomate de árbol y la leche de soja kefirada en proporciones del 70%, 60% y 50%

Este estudio se realizó con muestras recién preparadas y un par de días después con muestras conservadas a 4°C en frigorífico. Los ensayos se realizarán, además, a tres temperaturas diferentes representativas de las tres zonas de Ecuador (costa, sierra y selva).

Se separa la pulpa del residuo de las semillas que lleva en su interior por medio de un colador (garantiza comportamientos no-Newtonianos), será siempre el mismo para dejar pasar similar tamaño de resto de pulpa, agitar siempre con la misma velocidad y durante el mismo tiempo. La leche que se va a emplear es fabricada en el país, por una conocida empresa radicada mayormente en la Costa ecuatoriana.

En la segunda fase de experimentación se realizó un barrido de amplitud. Empezando por un valor muy pequeño de deformación, del orden de 0.001 y terminando en 10 con el fin de medir la magnitud tanto de  $G'$  como de  $G''$ . Observa el intervalo en el que ambas permanecen constantes. Esa es la región de deformación en régimen lineal. En dicho régimen lineal se realizará un barrido de frecuencia. Se varía la frecuencia entre 100 y 0.01 Hz, dentro del régimen lineal. El barrido será en ese orden, de mayor a menor.

En cada ensayo independientemente cual sea, o que sustancia se esté ensayando se iniciará con una pre-cizalla, esto con el fin de iniciar todos los experimentos reológicos con un estado estructural reproducible del material.

### **3.4 Preparación de las muestras**

El tamaño de los gránulos de kéfir añadidos a la leche, cualquier agitación de cualquier tipo durante la fermentación, la temperatura, la maduración y las etapas siguientes al proceso de maduración de la bebida pueden afectar el pH, el sabor, la viscosidad, la composición química/microbiológica del producto final (Farnworth, 2003), por lo que es necesario establecer los pasos a seguir para la preparación de las muestras, eso conllevará a que la acumulación porcentual de errores sea mínima.

### 3.4.1 Preparación de la muestra de tomate de árbol:

Se escogieron frutos de un tamaño promedio entre 4 a 5 cm, con una madurez palpable al tacto por la leve suavidad del fruto. Su cáscara será extraída manualmente por medio de un cuchillo.

La pulpa del tomate de árbol ya una vez extraída su cáscara se someterá a un proceso de licuado durante dos minutos; posterior a ello la muestra se pasa a través de un tamiz plástico a fin de separar las semillas de la pulpa homogeneizada, lista tanto para su mezcla con la leche de soja kefirada como para realizar ensayos solo a la pulpa como indica el protocolo inicialmente.

### 3.4.2 Preparación de la muestra de leche de soja kefirada:

Los gránulos de kéfir que se dejan en reposo comúnmente en leche, serán lavados con agua destilada, y pesados con el fin de saber la cantidad de leche de soja en la cual deben ser sumergidos.

La leche de soja utilizada es producida en Ecuador por una reconocida marca nacional, se ha elevado su densidad y enriqueciendo la bebida de soja antes de la fermentación, mediante la adición de leche de soja en polvo hasta alcanzar un valor de  $1.1 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$  (Chang, 1990).

Se adicionó 8[g] de leche de soja en polvo a la leche de soja líquida, esto ha favorecido la fermentación debido al enriquecimiento de sacarosa, rafinosa y estaquiosa, carbohidratos de bajo peso molecular encargados de la fermentación de la leche y la proliferación del ácido láctico. Un valor agregado a ello es el aumento de su viscosidad lo cual mejora su textura.

Utilizando una relación de 50 [g/L] se inocularon los gránulos de kéfir en leche de soja usando un vaso de precipitado de capacidad adecuada. Se midió el pH inicial de la preparación (gránulos de kéfir + leche de soja)

La preparación se deja reposar durante 24 horas a 20°C. Al finalizar el tiempo de fermentación se tomó la medida del pH nuevamente. Luego los gránulos de kéfir fueron separados de la leche fermentada con ayuda de un tamiz plástico, se lavaron con agua destilada, se escurrieron y se determinó su masa

nuevamente con el fin de agregar la cantidad de leche adecuada para un nuevo proceso de fermentación, este proceso se llevó acabo en dos frascos iguales con el fin de obtener muestras de leche diarias para el proceso experimental.

## Capítulo 4

### 4. Análisis e Interpretación de Resultados

En el presente capítulo se detallarán los resultados de las pruebas reológicas, su interpretación y el control del pH de la preparación final.

#### 4.1 Análisis del Estudio Reológico

Se analizaron únicamente mediante ensayos de curvas de flujo estacionario el comportamiento viscoso de la leche de soja, la pulpa de tomate de árbol y la leche de soja kefirada todas ellas a 4°C, 10°C, 20°C y 30°C; para las muestras de las combinaciones de leche de soja kefirada con tomate de árbol en diferentes porcentajes de combinaciones se realizaron ensayos amplitud y frecuencia con la finalidad de hallar el módulo de elasticidad. Los resultados arrojados fueron los siguientes.

##### 4.1.1 Leche de soja

El trabajo con la leche de soja se realizó en dos etapas, la primera comprendió el estudio de la leche de soja sola, sin agregar la leche de soja en polvo. La segunda fase se realizó agregando la leche de soja en polvo y en base al esfuerzo más no a la velocidad de cizalla con el fin de obtener las viscosidades más altas en regímenes de bajas velocidades

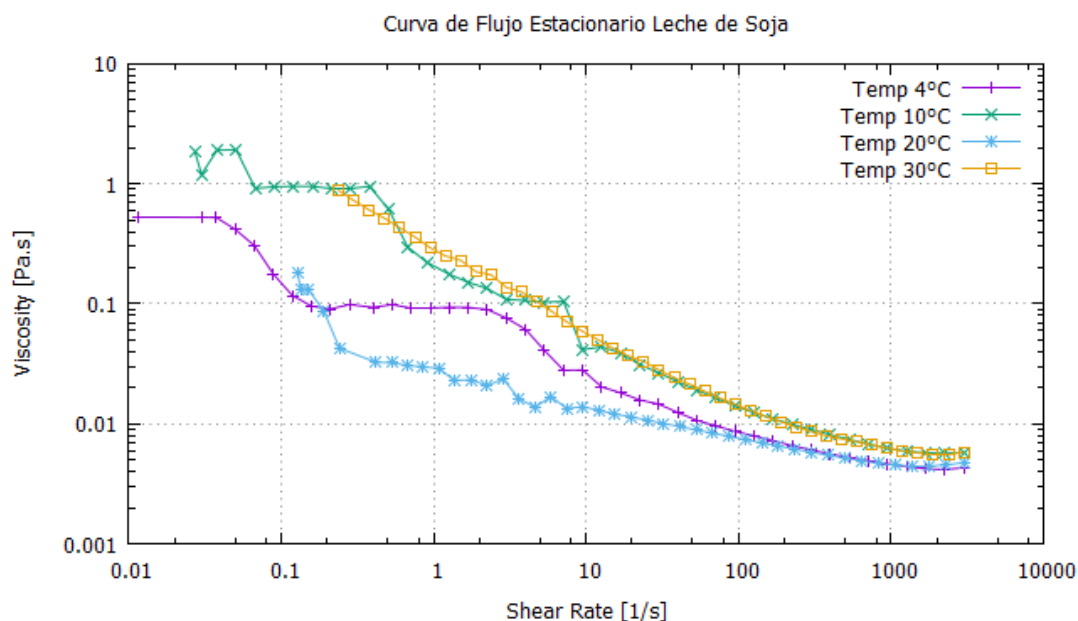


Figura 13: Curva de flujo estacionario de la leche de soja sola, curva basada en la velocidad de cizalla.

En los primeros ensayos efectuados sobre la leche de soja, se partió imponiendo la velocidad de cizalla, al ser una sustancia de baja viscosidad el reómetro le cuesta trabajo realizar las mediciones de la viscosidad a bajas velocidades por lo tanto se trabajó en lo posterior en base al esfuerzo controlado con el fin de encontrar producto del ensayo también la velocidad.

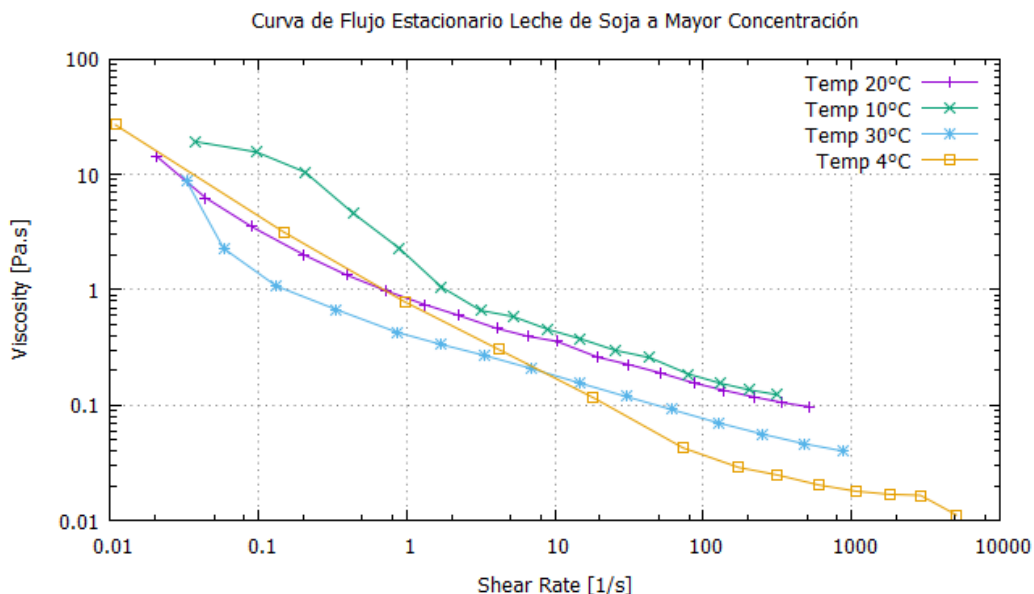


Figura 14: Curva de flujo estacionario de la leche de soja a mayor concentración.

Los ensayos realizados en base al control del esfuerzo arrojaron mejores resultados expresados en la Figura 14, la leche de soja al tener mayor consistencia demuestra que su viscosidad se ha elevado y mantiene su comportamiento shear thinning.

#### 4.1.2 Pulpa de tomate de árbol

En el tomate de árbol se trabajó en relación a la velocidad de cizalla, comenzando con velocidades altas y finalizando los ensayos a bajas velocidades, se realizaron 6 ensayos por cada variación de temperatura para encontrar la tendencia en la repetitividad de los datos obtenidos. La siguiente figura expone lo dicho anteriormente:

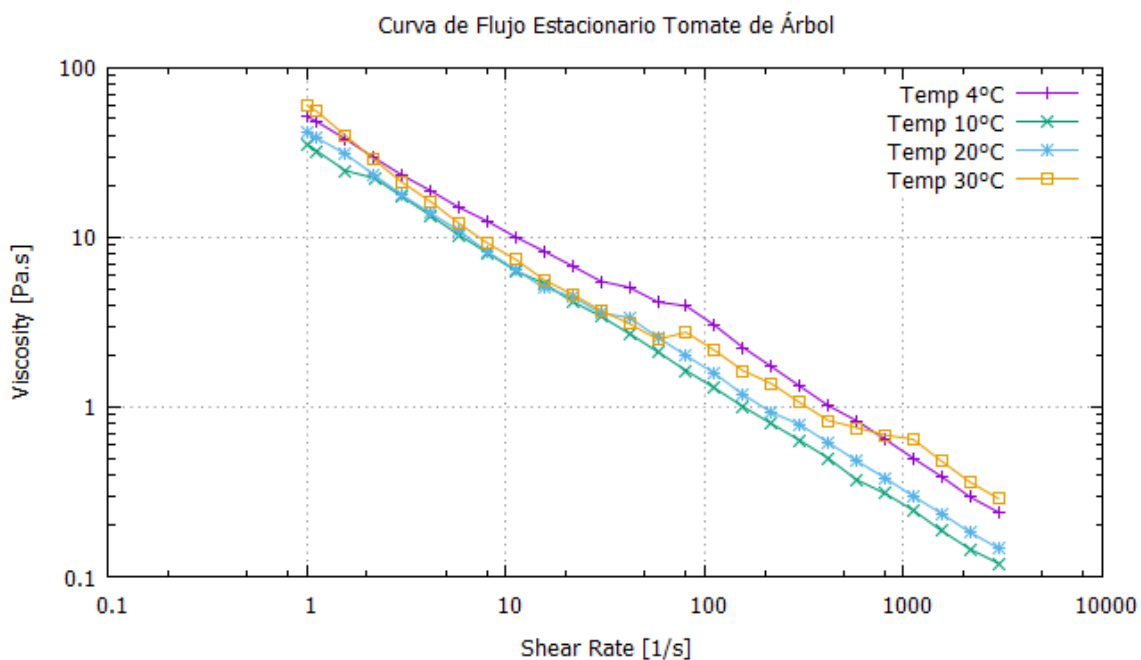


Figura 15: Curva de flujo estacionario de la pulpa de tomate de árbol.

#### 4.1.3 Leche de soja kefirada

Al tener la leche de soja mayor consistencia y mayor densidad, sus valores de viscosidad han crecido lo que se ve reflejado en la figura 16

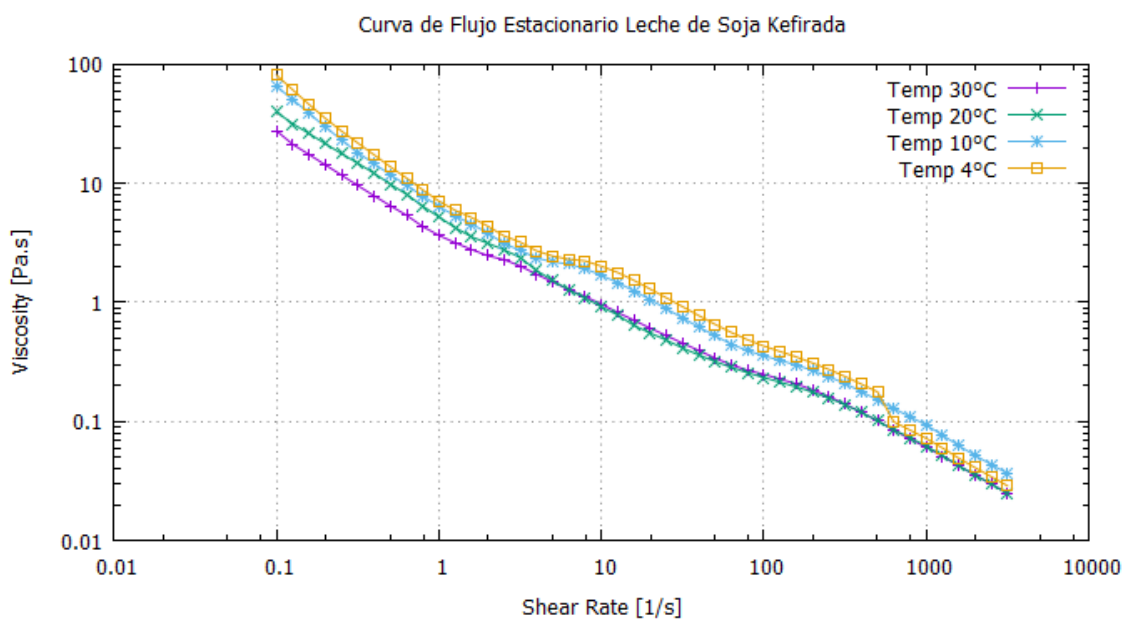


Figura 16: Curva de flujo estacionario de leche de soja kefirada en el rango de velocidad de 0.1 a 3000 [1/s].



#### 4.1.4 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 50%

Se mezcló kéfir de leche de soja con la pulpa de tomate de árbol en proporciones iguales, los resultados de la viscosidad medida en el rango de 0.1 a 3000 [1/s] fue mayor a las siguientes combinaciones, producto de la mayor adición de jugo de tomate de árbol.

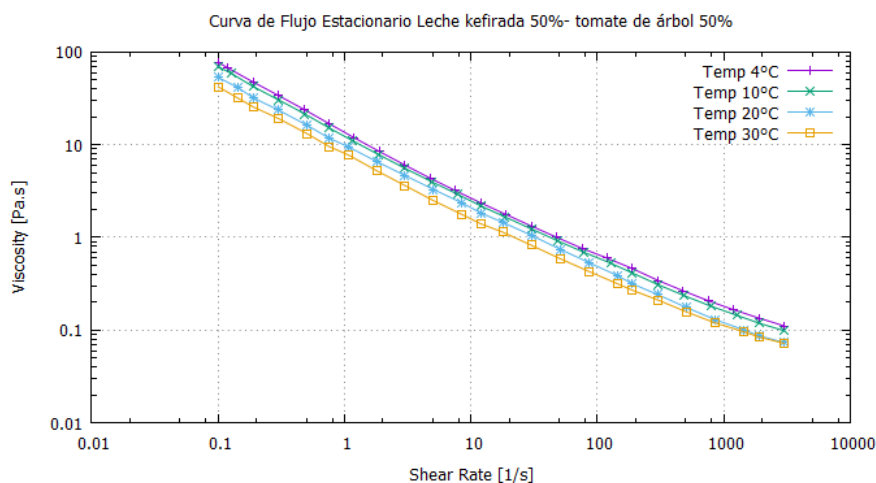


Figura 17: Curva de flujo estacionario a la combinación de kéfir de leche de soja con pulpa de tomate de árbol al 50%.

#### 4.1.5 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 40%

Se realizaron ensayos de flujo estacionario a mezclas de leche de soja kefirada mezclada con pulpa de tomate al 40% obteniendo los resultados expresados en la figura 18.

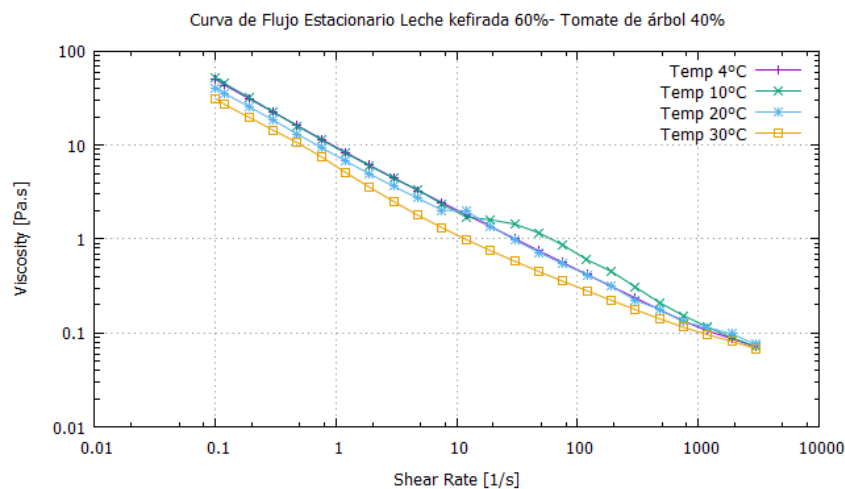


Figura 18: Curva de flujo estacionario de la mezcla kéfir de leche de soja con tomate de árbol al 40%.

#### 4.1.5 Mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol al 30%

En la combinación de kéfir de leche de soja con tomate de árbol al 30% se obtuvo el índice de menores viscosidades en relación a las demás mezclas, esto es debido a la menor consistencia y densidad que posee la leche de soja

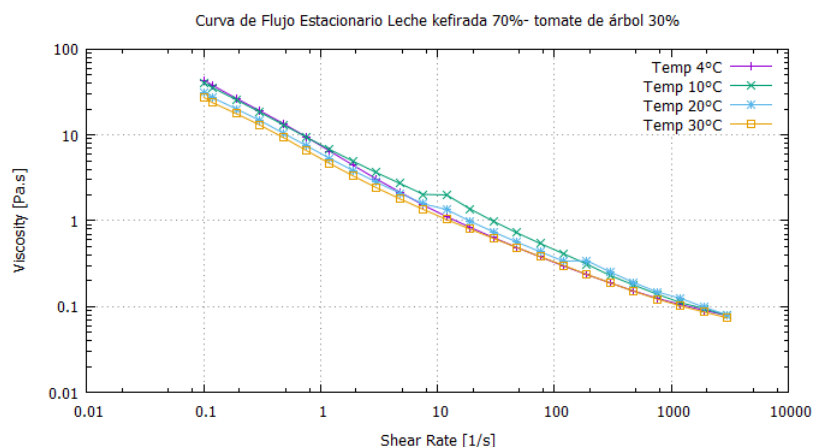


Figura 19: Curva de flujo estacionario de la leche de soja kefirada con tomate de árbol al 30%.

#### 4.1.6 Análisis de viscosidad en relación a la variación de la temperatura

Se realizó la comparación de las curvas de flujo estacionario en relación a la temperatura observando la variación del comportamiento de la viscosidad tanto en relación a su composición y a la variación de la temperatura obteniendo los siguientes resultados descritos por las figuras 20, 21, 22 y 23.

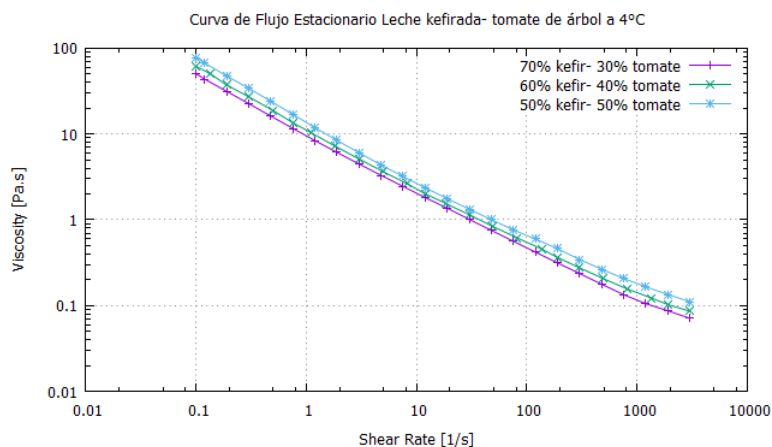


Figura 20: Curvas de flujo estacionario a 4°C, manteniendo la temperatura y variando el porcentaje de composición.

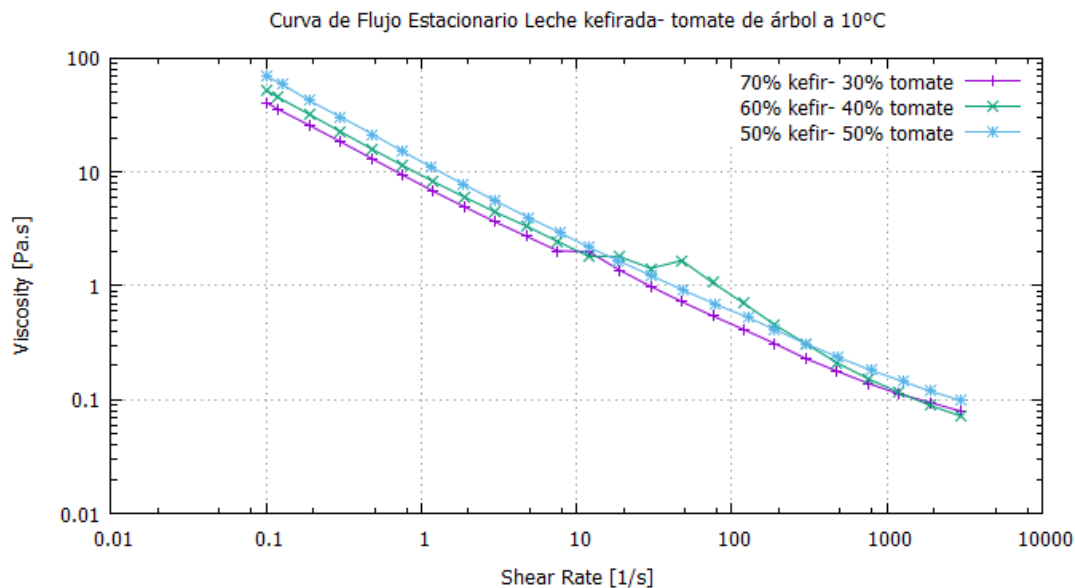


Figura 21: Curva de flujo estacionario a 10° de temperatura variando la composición porcentual de la mezcla.

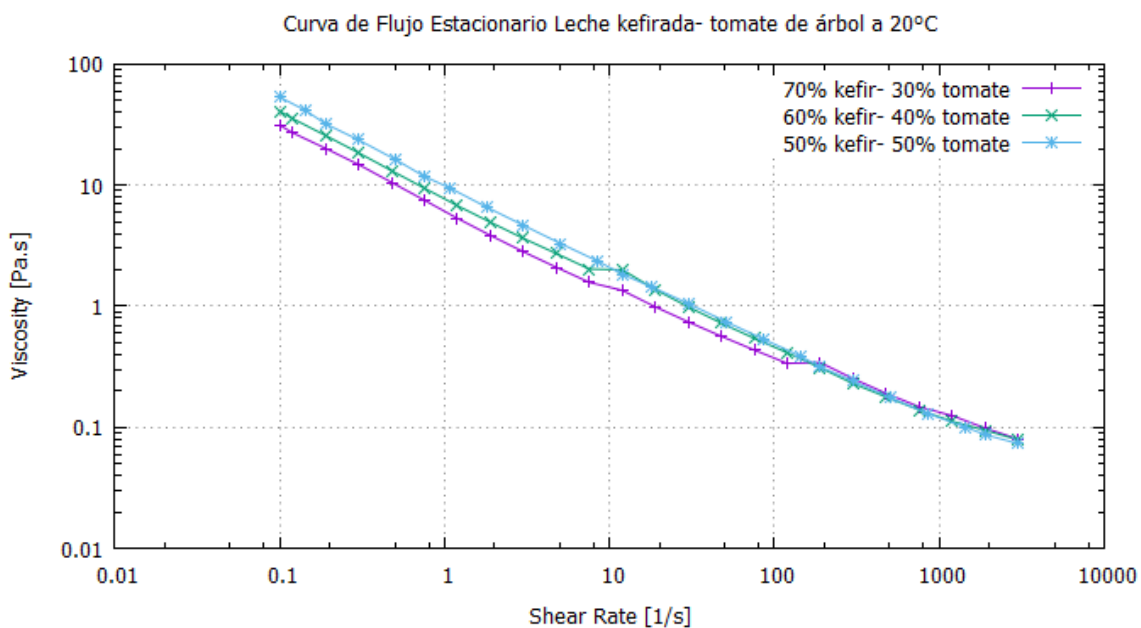


Figura 22: Curva de flujo estacionario a 20°C, la temperatura se mantiene constante, mientras que el grado de composición varía al 30%, 40% y 50% de contenido de tomate de árbol.

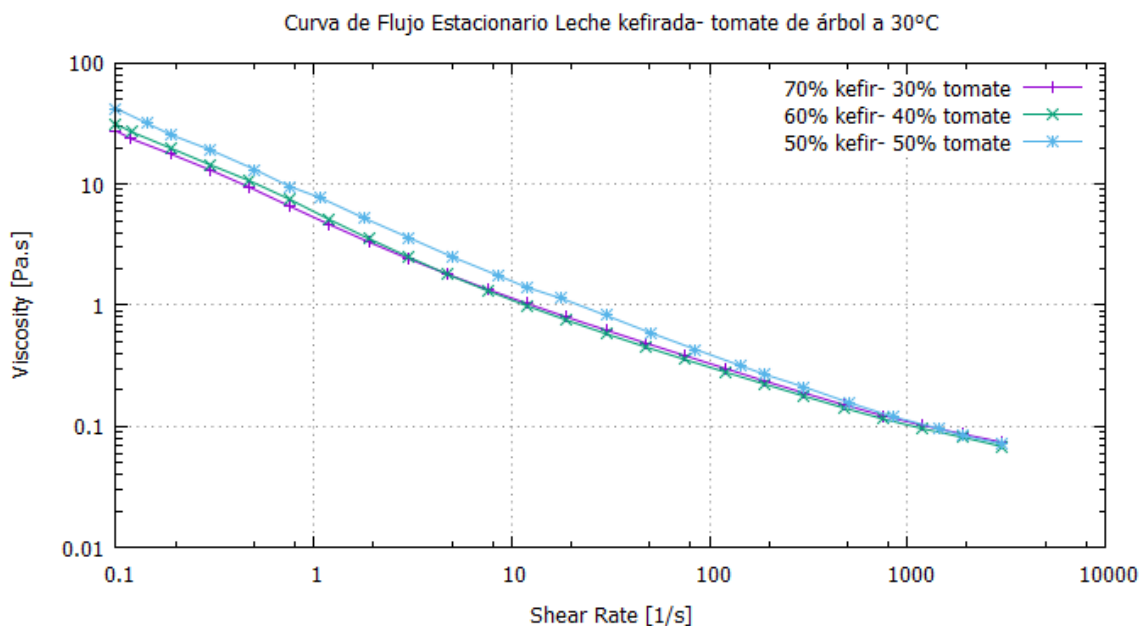


Figura 23: Curvas de flujo estacionario de las combinaciones al 30%, 40% y 50% de tomate de árbol, realizadas a 30°C.

En las Figuras 20, 21, 22, 23 se muestran las curvas de viscosidad estacionaria obtenida al realizar un barrido de velocidad de cizalla, entre 0,1 y 3000 [1/s], a las muestras de kéfir de leche de soja con jugo de tomate de árbol, se les agrupo para un mejor análisis por el grado de su composición con el fin de apreciar su cambio de comportamiento en función de la temperatura a la que esta sometida la muestra. El comportamiento general observado, es reofluidificante (shear-thinning), es decir, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de cizalla. Se observa un ligero cambio de pendiente en la región de más bajas velocidades de cizalla (inferiores a 10 s<sup>-1</sup>). Este resultado es justificable ya que en dicha región existe una mayor dificultad para el reómetro trabajar sobre la muestra, al trabajar en modo de cizalla continua, se alcanzan resultados precisos, considerando que el material en estudio no es homogéneo totalmente.

Es por ello que se utilizó la regla Cox-Merz con la cual y en conjunto con la aplicación de ensayos oscilantes en la región viscoelástica lineal, que será detallada a continuación, una respuesta más precisa en la región de bajas velocidades de cizalla. La regla empírica Cox-Merz relaciona la respuesta viscoelástica lineal del sistema sometido a cizalla oscilante con su comportamiento en cizalla continua estacionaria. Es decir, afirma que la dependencia de la viscosidad estacionaria ( $\eta$ ) con la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) coincide con la dependencia de la viscosidad compleja viscoelástica lineal ( $|\eta^*|$ ) con la frecuencia ( $\omega$ ) (Macosko, 1994), lo que se puede describir en la siguiente ecuación:

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)|; \quad \dot{\gamma} = \omega \quad \text{Ec. 3}$$

En las Figuras 16, 17, 18 y 19 se muestra también la dependencia  $|\eta^*(\omega)|$ . También se puede apreciar que la respuesta es lineal en la representación doble logarítmica, que coincide, con la respuesta lineal de la viscosidad estacionaria observada a altas velocidades de cizalla.

Finalmente, se han utilizado los valores de los ensayos oscilantes en la región de bajas frecuencias y los de cizalla continua a altas velocidades de cizalla para ajustar el modelo de Waele-Ostwald, conocido también como ley de potencias,

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{Ec. 4}$$

El modelo de Waele- Ostwald tiene dos parámetros de ajuste, “K” o índice de consistencia y “n” o índice de flujo. Si  $n=1$  la ecuación de la ley de potencia predice comportamiento Newtoniano, mientras que  $n<1$  corresponde al comportamiento reofluidificante (shear thinning) y  $n>1$  reflejaría comportamiento reoespesante (aumento de la viscosidad con la cizalla). El resultado del ajuste ( $r^2 = 0,9887$ ), fue  $n = -0,608 \pm 0,007$  y  $K = 5,8445 \pm 2,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Comparando con los resultados obtenidos en la anterior investigación (Rubio, Ramírez, Cuzco, & Delgado, 2015) al mezclar kéfir de leche con el jugo de tomate de árbol, se

puede corroborar que tanto la temperatura y la cantidad porcentual de composición puede modificar notablemente el valor de los parámetros del modelo de Waele-Ostwald, sin embargo sus cualidades permanecen inalterables.

#### 4.1.6 Análisis de la respuesta viscoelástica del sistema

Para determinar la respuesta viscoelástica de la mezcla de leche de soja kefirada con jugo de tomate de árbol, se realizaron ensayos de cizalla oscilante. En este caso la deformación aplicada al sistema ( $\gamma$ ) varía sinusoidalmente con una frecuencia " $\omega$ " respecto de un valor máximo ( $\gamma_0$ ),

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

Se realizaron dos ensayos reológicos en cizalla oscilante. En el primer caso se realizó un barrido de amplitud, ensayo donde se mantiene constante la frecuencia de la oscilación y se varía en forma ascendente la amplitud de la misma con lo que se modifica la intensidad de la acción mecánica sobre el sistema. La respuesta del ensayo de amplitud define la región de respuesta lineal del sistema, donde pueden definirse parámetros reológicos característicos del material, de la región de respuesta no-lineal (Mezger T. G., 2006). En general, la respuesta mecánica, que se mide con el esfuerzo  $\tau$  con el que el material se opone a ser deformado, estará desfasada un ángulo  $\delta$  respecto de la deformación aplicada. (Barnes, Hutton, & Walters, 2005)

$$\tau(t) = \tau_0 \text{sen}(\omega t + \delta) \quad \text{Ec. 6}$$

Al desarrollar la función trigonométrica se puede separar el esfuerzo respuesta total en dos términos, un esfuerzo consecuencia de la estructura elástica del material, que estará en fase con la deformación, y un esfuerzo consecuencia del flujo viscoso del material, que estará en cuadratura de fase con la deformación (Barnes H. , 2000). Es decir, la ecuación (4) se podrá expresar de la siguiente manera:

$$\tau(t) = (\tau_o \cos\delta) \text{sen}\omega t + (\tau_o \text{sen}\delta) \text{cos}\omega t \quad \text{Ec. 7}$$

Esto define dos parámetros reológicos, el módulo elástico ( $G'$ ) y módulo viscoso ( $G''$ ),

$$G' = \frac{\tau_o \cos\delta}{\gamma_o} \quad \text{Ec. 8}$$

$$G'' = \frac{\tau_o \text{sen}\delta}{\gamma_o}$$

Tanto  $G'$  como  $G''$  son independientes de la amplitud, es decir, caracterizarán de forma apropiada al material, cuando la respuesta sea lineal ( $\tau_o \propto \gamma_o$ ). En la Figura 24 se muestran barridos de amplitud que se realizaron al sistema en estudio para dos valores diferentes sugeridos de frecuencia. Se observa que en todos los casos el módulo elástico es mayor que el módulo viscoso, lo que indica que el sistema desarrolla cierto nivel estructural cuando se encuentra en el estado de reposo. Cuando la frecuencia fija de la oscilación aumenta, el área de comportamiento lineal es mínima, lo cual es indicativo de fatiga en la microestructura interna del sistema. (Rubio, y otros, 2013)

Al considerar el caso menos favorable (10 rad/s) y con el fin de asegurar que los ensayos de barrido de frecuencia sean realizados en la región de respuesta lineal, se tomará una amplitud fija de oscilación de  $\gamma_o = 0,1\%$ .

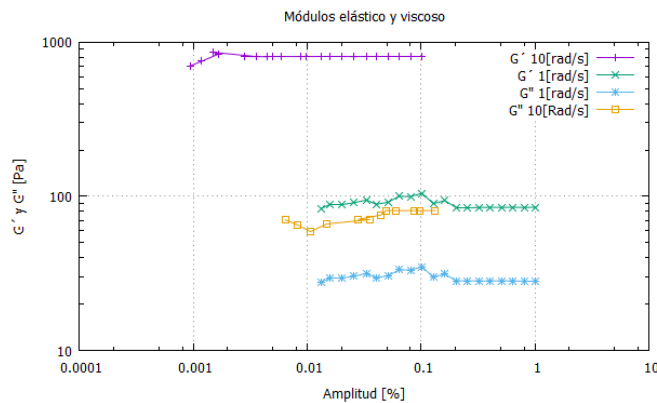


Figura 24: Módulos elástico y viscoso en función de la amplitud de oscilación. La región de respuesta lineal se reduce al aumentar la frecuencia fija de oscilación.

Se realizó barridos de frecuencia, es decir, se mantiene constante la amplitud de la oscilación y se varía la frecuencia, con el fin de obtener los datos necesarios acerca del comportamiento del material en función de la duración de la acción del reómetro sobre la muestra. En la siguiente figura se muestra la dependencia de los módulos viscoelásticos lineales con la frecuencia de la oscilación. Se observa que en el rango de frecuencias estudiado el módulo elástico es siempre superior al módulo viscoso y, además, ambos módulos aumentan solo ligeramente con la frecuencia de la oscilación. Por otra parte, la constancia de la tangente del ángulo de pérdidas ( $\tan\delta = G'/G''$ ) (Macosko, 1994). Se concluye, entonces, que el sistema compuesto por la leche de soja kefirada/jugo de tomate de árbol es un sistema floculado que genera una estructura tipo gel.

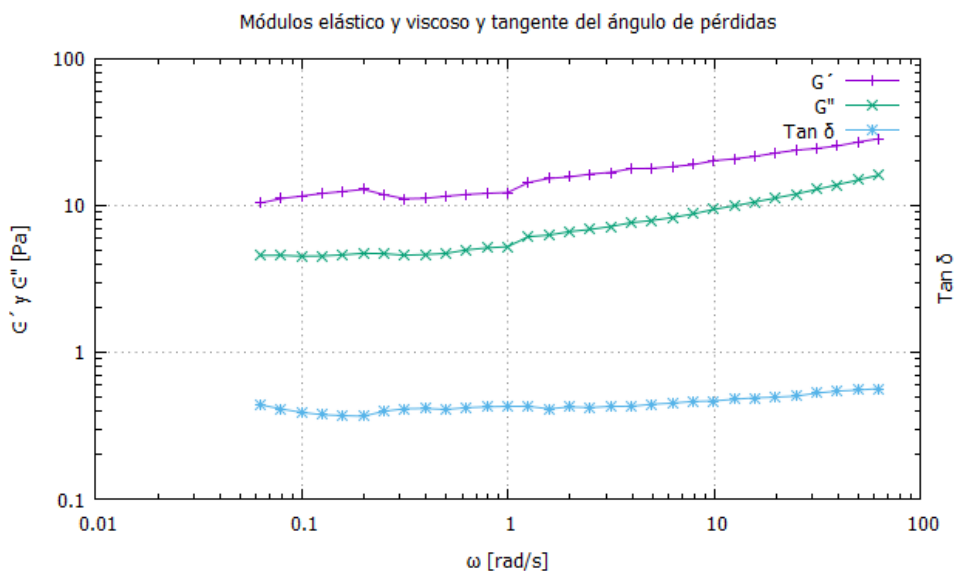


Figura 25: Módulos elástico y viscoso y tangente del ángulo de pérdidas en función de la frecuencia de oscilación.

#### 4.2 Medición del pH.

Previamente a la medición, se calibró el pH-metro, (con buffer pH 4 y buffer pH 7) y se tomó una muestra de la leche en fermentación de la siguiente manera:

- Se agita levemente la muestra para su homogenización



- Se separaron los gránulos de kéfir de la leche de soja fermentada (por medio de un cedazo plástico).
- A la sustancia en estudio se le tomó el pH sumergiendo el electrodo directamente a la muestra. Esto se realizó por triplicado, y se reportó el promedio de dichos valores.

Los valores de pH obtenidos se muestran en la siguiente tabla

Tabla 3:

Valores de pH en relación a los tiempos de fermentación

<b>Tiempo de fermentación [h]</b>	<b>Valor Ph</b>		
	<b>Composición 60- 40</b>	<b>Composición 50- 50</b>	<b>Composición 70-30</b>
<b>0</b>	6,54	6,59	6,53
<b>2</b>	6,30	6,37	6,32
<b>4</b>	5,79	5,81	5,82
<b>6</b>	5,43	5,38	5,32
<b>8</b>	4,98	5,02	4,99
<b>24</b>	4,53	4,56	4,57

Se puede observar que el pH va cambiando su valor a ácido conforme transcurre el tiempo. Factores adicionales como la agitación de la leche y el porcentaje de mezcla son factores influyentes en la fermentación de la leche, debido a la liberación de etanol, lo cual causa que disminuya la velocidad de fermentación. (Farnworth, 2003). La temperatura durante la fermentación se mantuvo a 20°C, este es un factor que también influye en la velocidad de fermentación y por lo tanto en el pH; esto es debido que a mayor temperatura se produce una mayor cantidad de etanol (Goršek & Tramšek, 2010), esto provoca una disminución de pH más acelerado.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- La viscosidad de la bebida se reduce gradualmente conforme la velocidad se eleva lo cual describe que el comportamiento de esta bebida es shear thinning o reofluidificante y viscoplástico, es decir, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de cizalla. Existe un pequeño rango bajo  $0.1 [1/s]$  donde la viscosidad tiende al infinito. Sin embargo, una medición cuidadosa y paciente por debajo de esta velocidad de corte muestra que la viscosidad es todavía finita, y se nivela a un valor constante que variará conforme la temperatura disminuye.
- Se comprobó que, a pesar de la ausencia de lactosa como sustrato, la acidificación en este proceso es debida a la producción de ácido láctico por parte de otros componentes existentes en la leche de soja como la sacarosa, rafinosa y estaquiosa, y que el contenido de sólidos de la bebida utilizada para el análisis reológico influye en la viscosidad y textura alcanzada en el producto final.
- La viscosidad aumento conforme la bebida se volvía más ácida con un valor de pH de 4.5 a 4.6 después de 24 horas de reposo y fermentación, los valores de la viscosidad final del producto oscila entre 30 a 60 [Pa.s] con una

composición de 50% de contenido de kéfir de leche de soja y 50% de contenido de jugo de tomate de árbol.

- Conforme los resultados arrojados en la investigación realizada el año 2015 acerca de la caracterización reológica de la mezcla kéfir/ tomate de árbol, la viscosidad de la leche de soja kefirada es menor en relación al kéfir cultivado en leche de vaca, adicionalmente la textura de la bebida en estudio tiene características similares a los yogures comerciales lo cual lo hace aceptable para el consumo sobretodo en la población infantil.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda en futuras investigaciones realizar los análisis reológicos de bebidas de leche soja con la adición de otras frutas o de otras fuentes de azúcares que podrían causar una mayor fermentación que provocarían el cambio de su estructura, su textura y viscosidad, incluso posterior a su envasado y almacenamiento.
- Se recomienda realizar la caracterización reológica a la presente bebida a temperaturas que oscilen entre los 80°C a 100°C, temperaturas a las cuales el producto podría ser pasteurizado, con el fin de observar si existen cambios considerables en su textura y viscosidad.

## Bibliografía

- Banfill, P. (2006). Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology reviews*, 61.
- Barnes, H. (2000). *Handbook of Elementary Rheology*. Aberystwyth: Cambrian Printers.
- Barnes, H. A. (1997). Thixotropy a Review. *Journal Non-Newtonian Fluid Mech.*
- Barnes, H., Hutton, J., & Walters, K. (2005). *An Introduction to Rheology*. Oxford: Elsevier.
- Cajamarca, L., & Gonzalez, P. (2011). *Determinación de Puntos de Defloculación de Esmlates y Engobes Utilizados en Cerámicas GRAIMAN*. Cuenca: UAZUAY.
- Carrá, M., Merino, L., & Marin, V. (2012). Kefir un alimento Probiótico a Costo Cero. *Univ. Nacional de Córdoba*, 20.
- Chandan, R. (1982). Other Fermented Dairy Products. *Prescott and Dunn's Industrial Microbiology*, 113-184.
- Chandan, R. (1982). *Other Fermented Dairy Products*. Wesport: AVI Pub. Co.
- Chang, C.-y. (1990). Effect of total soymilk solids on acid production by selected lactobacilli. *J. Food Science*. 55 (6), 125- 129.
- Coleman, P. C., & Painter, M. M. (1997). *Fundamentals of polymer science : an introductory text (2nd ed.)*. Lancaster: Technomic.
- Crespo, C., & Landines, E. (2011). *Diseño de una Planta de Procesamiento de Leche de Soya para la Fundación Hogar de Cristo*. Guayaquil: ESPOL.
- Crespo, C., & Landines, E. (2011). *Diseño de una Planta de Procesamiento de Leche de Soya para la Fundación Hogar de Cristo*. Guayaquil: ESPOL.
- Díaz Ocampo, R., García Zapateiro, L., Franco Gómez, J. M., & Vallejo Torres, C. (2012). CHARACTERIZATION BROMATOLOGICAL, PHYSICO-CHEMICAL, MICROBIOLOGICAL AND RHEOLOGICAL IN BOROJO PULP (Borojoa patinoi Cuatrec). *Revista Ciencia y Tecnología*, 17-24.
- Domínguez, A. (2011). "EVALUACION DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA VISCOSIDAD DE LA PAPILLA DE ZANAHORIA INDUSTRIAL. Xalapa: Univ. de Veracruz.

- Doraiswamy, D. (2002). The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion. *Rheology Bulletin* 71.
- FAO. (Enero de 2017). *FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/t0532e/t0532e09.htm#8.3.1>
- Farnworth, E. (2003). *Handbook of Fermented Functional Foods*. Boca Raton: CRC Press.
- FRANK, A. (2016). *Understanding Rheology of Structured Fluids*. Obtenido de TA INSTRUMENTS: <http://www.tainstruments.com/>
- Galindo, F. J., Rubio, F. J., & Velázquez, J. F. (2009). Galindo-Rosales, Francisco J.; Rubio-Hernández, Francisco J.; Velázquez-Navarro, José F. (Shear-thickening behavior of Aerosil® R816 nanoparticles suspensions in polar organic liquids. *Galindo-Rosales, Francisco J.; Rubio-Hernández, Francisco J.; Velázquez-Navarro, José F. (22 May 2009). "Shear-thickening behaRheologica Acta, 699-708.*
- García, J., & Hernández, R. (2015). *FERMENTACION DE LECHE DESCREMADA UHT A PARTIR DE GRÁNULOS DE KÉFIR*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- González, S. (2009). *Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos*. Cartagena: UPCT.
- Gorzek, A., & K., Z. (2000). Experimental assesment of the impact of cultivation conditions on kefiran production by mixed microflora imbedded in kefir grans. *International Journal of Chemical Reactor Engineering. University of Maribor, 481- 486.*
- GRANATA, L. A., & Morr, C. (1996). Improved Acid, Flavor and Volatile Compound Production in a High Protein and Fiber Soymilk Yogurt-like Product. *Journal of Food Science, 331-336.*
- Gutiérrez, J. (2013). *EFEECTO DEL TIPO DE CARNAZA SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL LICOR DE GELATINA PURA DE ORIGEN BOVINO*. Ambato: UTA.
- Hargrove, R. (1970). Fermentation Products from Skim Milk. *Milk, B.H. Webb y E.O. Whittier, 24-42.*

- Harper, J., & El Sahrigi, A. (1965). Viscometric behavior of tomato concentrates. *J. Food Sci.*, 470- 476.
- Hauman, B. (1984). Soymilk: New processing, packaging. Expand markets. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 61-65.
- Heldman, R., & Singh, P. (2013). *Introduction to food engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- Herrera, L., Medina, A., & Naranjo, G. (2008). *Tutoría de la investigación científica: Guía para elaborar en forma creativa y amena el trabajo de graduación* (1ra ed.). Quito, Ecuador: Empresdane Gráficas.
- Hildago, R. (1997). Determinación de propiedades reológicas y transporte de fluidos no newtonianos. *Escuela Politécnica Nacional*, 107.
- IFIS, (. F. (2006). *Food Science and Technology Bulletin: Fu, Volumen 2*. Reading UK: Advirosoy Board.
- INEN. (2011). Lechas Fermetadas, Requisitos. En I. E. NORMALIZACIÓN, *Norma Tpecnica Ecuatoriana NTE-ENEN* (pág. 8). Quito: INEN.
- INEN. (2013). *NORMA GENERAL DEL CÓDEX PARA LOS ADITIVOS ALIMENTARIOS (MOD)*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- INEN-1909. (2015). *FRUTAS FRESCAS. TOMATE DE ÁRBOL. REQUISITOS*. Quito: NTE-ENEN.
- Irgens, P. (2014). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Springer.
- ISMAIL, A., EL-NOCKRASHY, S., & KHORSHID, M. A. (1983). A beverage from separated buffalo milk fermented with kefir grains. *International Journal of Dairy Techonology*, 117-118.
- Kane, J., & Sterheim, M. (2007). *Física*. Barcelona: Reverte.
- Kosikowski, F. (1977). *Cheese and Fermented Milk Foods*. Ann Harbour: F.V. Kosikowski Associates.
- LACOMET. (marzo de 2017). *Laboratorio Costarricense de Metrología*. Obtenido de <http://www.lacomet.go.cr/index.php/viscosidad/que-es-la-viscosidad>

- Latorre-García, L., Del Castillo, L., & Polaina, J. (2007). Taxonomical classification of yeasts isolated from kefir based on the sequence of their ribosomal RNA genes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 785–791.
- López, O., & Pinto, K. (2011). *ESTUDIOS REOLÓGICOS DE LOS FLUIDOS VISCOELÁSTICOS SURFACTANTES UTILIZADOS EN OPERACIONES DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO*. Bucaramanga: UIS.
- Lui, J. R., & Lin, C. W. (2000). Production of Kefir from Soymilk With or Without Added Glucose, Lactose, or Sucrose. *Food Microbiology and Safety Vol 65, No 4*, 716-719.
- Macosko, C. (1994). *Rheology: Principles, Measurements and Applications*. Wiley- VCH.
- Mann, E. (2003). Kefir and koumiss. *Dairy Industries International*, 12.
- Marshall, V. (1986). *The Microflora and Production of Fermented Milks*. Amsterdam: Elsevier.
- Mendoza, F. (9 de Abril de 2011). Todo el año hay tomate de árbol. *El Comercio*, pág. 12.
- Messina, M., Persky, V., Setchell, K., & Barnes, S. (1994). Soy intake and cancer risk: a review of the in vitro and in vivo data. *National Cancer Institute, National Institutes of Health*, 113-131.
- Mezger, T. (2006). *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co KG.
- Mezger, T. G. (2006). *The Rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. Hannover: Vincentz Network.
- Monsalve, A. (2010). Reología, la Ciencia que Estudia el Movimiento de Fluidos. *Remetallica*, 21-27.
- Murti, T., Bouillanne, C., Landon, M., & Desmazeaud, M. (1992). Bacterial growth and Volatile compounds in Yoghurt-type products from soymilk containing Bifidobacterium ssp. *Journal Science of Food* , 153-157.
- NELSON, A., STEINBERG, M., & WEI, L. (1976). ILLINOIS PROCESS FOR PREPARATION SOYMILK. *Jornal of Food Science*, 57-61.

- Oberman, H. (1985). Fermented Milks. *Microbiology of Fermented Foods*, B.J. WOOD, Elsevier, 167-195.
- Oliveira, A., Lemos, M., Peixoto, R., Soares, A., Trajano, J., & Flosi, V. (2013). Microbiological, technological and therapeutic properties of kefir: a natural probiotic beverage. *Journal of the Brazilian Society for Microbiology*, 341- 349.
- Peláez, L. (2013). *Estudio de la capacidad de los microorganismos del kéfir para inhibir el desarrollo fúngico y para secuestrar micotoxinas*. Ciudad de La Plata: UNLP.
- Rao, M. (2005). *Engineering properties of foods*. New York: Taylor & Francis.
- Roussel, N. (2011). Understanding the rheology of concrete. Elsevier.
- Roussel, N. (2011). *Understanding the Rheology of Concrete*. Elsevier.
- RUA. (2008). TEMA 2. FLUIDOS VISCOSOS. En J. García Quesada. Alicante: RUA.
- Rubio, F., Ramírez, M., Cuzco, A., & Delgado, R. (2015). Estudio de la Caracterización Reológica de la Mezcla Kéfir con Tomate de Árbol. *RIBIM*.
- Rubio, F., Velázquez, J., & Ordóñez, L. (2013). Rheology of concrete: a study case based upon the use of the concrete equivalente mortar. *Material and Structures*, 587-605.
- Steffe, J. (1996). Rheological methods in food process engineering (2nd Ed.). *East Lansing, USA*, 382.
- Tamine, A., & Robinson, R. (1988). Fermented Milks and their Future Trends. Part II. Technological Aspects. *J. Dairy Res.*, 281- 307.
- Tazraei, P., Riasi, A., & Takabi, B. (2015). The influence of the non-Newtonian properties of blood on blood-hammer through the posterior cerebral artery. *Mathematical Biosciences*, 119-127.
- Unimedios. (17 de Julio de 2012). *Agencia de Noticias UNE*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co>
- VANACOCKA, A. (2012). *Diseño de industrias agroalimentarias*. Madrid: Mundi- Prensa.
- Vedamuthu, E. (1982). Fermented Milks. *Economic Microbiology, Fermented Food*, 199-225.



Vite, L. (2014). Características de los líquidos. *Vida Científica*.

Witthuhn, R. C., Schoeman, T., & T.J., B. (2005). Characterization of the microbial population at different stages of Kefir production and Kefir grain mass cultivation. *International Dairy Journal* 15, 383-389.