



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**VARIACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
REOLÓGICO DURANTE LA VIDA DE ANAQUEL DE  
VARIOS PRODUCTOS ALIMENTICIOS.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**EDITH AZPEITIA ESQUIVEL**

**DIRECTOR DE TESIS:  
M. en F.Q. Graciela Martínez Cruz**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO. DE MÉXICO 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

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

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO  
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

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

Variación del comportamiento reológico durante la vida de anaquel de varios productos alimenticios.

Que presenta la pasante: Edith Azpetia Esquivel

Con número de cuenta: 099508362 para obtener el Título de la carrera: Licenciatura de Química

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

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de Mayo de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.B.Q. Saturnino Maya Ramírez	
VOCAL	M. en C. Graciela Martínez Cruz	
SECRETARIO	Q. Juana Cabrera Hernández	
1er. SUPLENTE	I.A. Sandra Margarita Rueda Enríquez	
2do. SUPLENTE	Q. Margarita Ordoñez Andrade	

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

IHM/cga\*

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida y enviarme con las personas adecuadas para concluir mis proyectos.

A mi madre, que con su demostración de una madre ejemplar me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos.

A mi padre, quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional.

A mi hijo, quien me apoyo con su alegría, su dedicación en su escuela el ser responsable en todo momento.

A todos mis profesores no solo de la carrera sino de otra carrera, mil gracias porque de alguna manera forma parte de lo que a hora soy. Especialmente agradezco de todo corazón a los tres profesores que estuvieron en todo momento con migo, apoyándome en el término del proyecto: profesor Antonio, profesora Graciela, profesora Juana.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto

*Son muchas personas a las que agradezco por su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunos están aquí con migo y otros en mis recuerdos y en el corazón.*

*Dios bendiga a cada una de las personas que se involucraron en este proyecto directa o indirectamente.*

# ÍNDICE

	PÁG.
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS PARTICULARES	3
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>4</b>
1.1 MULTICOMPONENTE	4
1.2 MULTIFÁSICO	4
1.3 MULTICOMPARTIMENTADO	4
1.3.1 SISTEMA CERRADO	5
1.3.2 SISTEMA ABIERTO	5
1.4 COLOIDES	6
1.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COLOIDES	7
1.4.2 ESPUMAS	8
1.4.3 SOLES	9
1.4.4 EMULSIONES	9
1.4.4.1 AGENTES EMULSIONANTES Y ESTABILIDAD DE EMULSIÓN	11
1.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS COMERCIALES	13
1.5.1 MAYONESA	13
1.5.2 YOGUR	14
1.5.3 SALSA CÁTSUP	16
1.5.3.1 PROPIEDADES DE LA SALSA CÁTSUP	16
1.6 FACTORES DE DESCOMPOSICIÓN	16
<b>2. CONCEPTOS DE REOLOGÍA</b>	<b>18</b>
2.1 DEFINICIÓN DE REOLOGÍA	18
2.2 EL NÚMERO DE DÉBORA	18
2.3 DEFORMACIÓN	18
2.4 ESFUERZO DE CIZALLA O DE CORTE	20
2.5 DEFORMACIÓN DE CORTE	21
2.6 VELOCIDAD DE CIZALLA O CORTE	21
2.7 VISCOSIDAD	22
2.8 MODELOS REOLÓGICOS:	22
2.9 FLUIDOS NEWTONIANOS	23
2.10 FLUIDOS NO NEWTONIANOS	24
2.10.1 FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO	26
2.10.1.1 FLUIDOS PLÁSTICOS DE BINGHAM	26
2.10.1.2 LEY DE POTENCIA	27
2.10.1.3 FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS	28
2.10.1.4 FLUIDOS REOESPESANTES	30
2.10.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO	31
2.10.2.1 FLUIDOS TIXOTRÓPICOS	31
2.10.2.2 FLUIDOS REOPÉCTICOS	33
2.11 REÓMETRO ELÉCTRICO RHEOLAB MC 120	35
2.11.1 APLICACIÓN	35
2.11.2 PRINCIPIO DE MEDICIÓN	35
2.11.3 MODO DE FUNCIONAMIENTO	36

2.11.3.1 MODO A DISTANCIA PARA FUNCIONAMIENTO CON EL ORDENADOR	36
2.11.3.2 PRUEBA DE ROTACIÓN	36
2.11.3.3 ESFUERZO DE CORTE	36
2.12.3.4 PRUEBA O MODO OSCILATORIO	36
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>37</b>
3.1 MATERIALES	37
3.1.1 EQUIPO	37
3.2 MÉTODO	38
3.2.1 PREPARACIÓN DEL REÓMETRO	38
3.2.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	38
3.2.3 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LAS MUESTRAS	38
3.2.4 CONDICIONES DE TRABAJO	39
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1. PRODUCTOS TRABAJADOS	40
4.2. GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA SALSA CATSUP	40
4.3. PARÁMETROS FÍSICOS DE CÁTSUP	42
4.4. DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL ANOVA DE UN SOLO FACTOR: SALSA CÁTSUP	42
4.5. GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA MAYONESA	44
4.6. PARÁMETROS FÍSICOS DE MAYONESA	46
4.7 DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL ANOVA DE UN SOLO FACTOR: MAYONESA	47
4.8. GRÁFICAS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE YOGUR	48
4.9. PARÁMETROS FÍSICOS DE YOGUR	50
4.10. DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL ANOVA DE UN SOLO FACTOR: YOGUR	51
<b>5. DISCUSIÓN</b>	<b>53</b>
5.1 REOGRAMAS	53
5.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	53
5.3 SALSA CÁTSUP	54
5.4 MAYONESA	57
5.5 YOGUR	59
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>62</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo de un zumo de fruta (Martínez 1999).....	6
Figura 1.2. Esquema de la estructura de una espuma (Badui, 2013).....	9
Figura 1.3. Esquema de los procesos de floculación coalescencia y separación en dos fases de una emulsión (Badui, 2013).....	10
Figura 1.4. Estabilización de una gota por una capa de partículas sólidas (Martínez 1999).....	13
Figura 2.1 Alargamiento lineal de una barra rectangular (Steffe, 1996).....	19
Figura 2.2 Deformación de cizalla de una barra rectangular (Steffe, 1996).....	20
Figura 2.3 Principio del esfuerzo de corte (Sharma, 2003).....	21
Figura 2.4 Principio de la deformación de corte (Sharma, 2003).....	21
Figura 2.5 Clasificación de los fluidos no newtoniano (Alvarado, 2001).....	22
Figura 2.6 Reograma de flujos típicos en la industria de alimentos (Alvarado, 2001).....	23
Figura 2.7 (a) Representación gráfica del esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) (b) Representación del coeficiente de viscosidad $\eta$ en función de $\dot{\gamma}$ (Méndez, 2001)...	24
Figura 2.8 El aceite de oliva, es un ejemplo de fluido newtoniano.....	24
Figura 2.9 Gráfica de un flujo no newtoniano (Méndez, 2001).....	25
Figura 2.10 Gráfica lineal de un fluido plástico de Bingham (Méndez, 2001).....	26
Figura 2.11 La mantequilla es un ejemplo de fluido plástico.....	27
Figura 2.12 Representación de la Ley de la Potencia o de Ostwald-Dewaele (Méndez, 2001).....	28
Figura 2.13 Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y un pseudoplástico (Méndez, 2001).....	29
Figura 2.14 La salsa cátsup y mostaza son un ejemplo de fluido pseudoplástico.....	29
Figura 2.15 Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y un reoespesante (Méndez, 2001).....	30
Figura 2.16 Fécula de maíz es un ejemplo de un fluido reoespesante (mezclado con agua da lugar a una masa, que se vuelve muy espesa al moverla).....	31
Figura 2.17 Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y uno tixotrópico (Méndez, 2001).....	32
Figura 2.18 El yoghur es un ejemplo de fluido tixotrópico.....	33
Figura 2.19 Gráficas de flujo reopéctico (Méndez, 2001).....	33
Figura 2.20 La clara de huevo da lugar a un fluido reopéctico.....	34
Figura 3.1 Reómetro Rheolab MC-120.....	37

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráficas 4.1 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátsup La Costeña T 10 y 25 °C de la semana 20.....	40
Gráficas 4.2 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátsup La Costeña T 25 °C a diferentes semanas.....	40
Gráficas 4.3 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátsup La Costeña y Del Monte T 25 °C.....	41
Gráficas 4.4 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátsup Del Monte y Clemente Jacques T 25 °C.....	41
Gráficas 4.5 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la T 10, 25 y 35°C de la semana 13.....	44
Gráficas 4.6 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Mayonesa Mc Cormick T 25 °C a diferentes semanas.....	44
Gráficas 4.7 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las mayonesas Mc Cormick y La Costeña T 25 °C.....	45
Gráficas 4.8 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las mayonesas Mc Cormick y La Costeña T 35.....	45

Gráficas 4.9 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la T 10, 25 y 35°C de la semana 10 .....	48
Gráficas 4.10 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para el yogur marca Alpura natural T 25 °C a diferentes semanas.....	49
Gráficas 4.11 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los yogur Alpura y Lala T 25 °C .....	49
Gráficas 4.12 La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los yogur Alpura y Lala T 35 °C .....	50

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Clasificación de sistemas coloidales de dos fases (Badui, 2013) .....	8
Cuadro 1.2 Componentes de la mayonesa .....	14
Cuadro 1.3.Componentes del yogur .....	15
Cuadro 1.4.Componentes de la cátsup.....	16
Cuadro 4.5 Productos trabajados en el laboratorio.....	40
Cuadro 4.6 Parámetros físicos de las diferentes marcas de salsa cátsup.....	42
Cuadro 4.7 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C de la salsa cátsup marca La Costeña .....	42
Cuadro 4.8 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C de la salsa cátsup marca La Costeña .....	43
Cuadro 4.9 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C de la salsa cátsup marca Del Monte .....	43
Cuadro 4.10 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C de la salsa cátsup marca Del Monte.....	43
Cuadro 4.11 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C de la salsa cátsup marca Del Monte.....	43
Cuadro 4.12 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C de la salsa cátsup marca Clemente Jacques .....	44
Cuadro 4.13 Parámetros físicos de las diferentes marcas de mayonesa .....	46
Cuadro 4.14 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C de la mayonesa marca McCormick .....	47
Cuadro 4.15 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C de la mayonesa marca McCormick .....	47
Cuadro 4.16.Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C de la mayonesa marca McCormick .....	47
Cuadro 4.17.Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C de la mayonesa marca La Costeña .....	47
Cuadro 4.18 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C de la mayonesa marca La Costeña .....	48
Cuadro 4.19 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C de la mayonesa marca La Costeña .....	48
Cuadro 4.20 Parámetros físicos de las diferentes marcas de yogur .....	50
Cuadro 4.21 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C del yogur marca Alpura .....	51
Cuadro 4.22 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C del yogur marca Alpura .....	51
Cuadro 4.23 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C del yogur marca Alpura.....	51
Cuadro 4.24 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 10°C del yogur marca Lala.....	51
Cuadro 4.25 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C del yogur marca Lala.....	52
Cuadro 4.26 Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C del yogur marca Lala.....	52

## RESUMEN

Se estudió el comportamiento reológico de algunos productos alimenticios<sup>1</sup>, en función de algunos parámetros característicos (esfuerzo de corte ( $\tau$ ), velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ), viscosidad aparente( $\eta$ ), índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ )). Se trabajó con un reómetro, marca Paar-Physica, modelo RHEOLAB MC-120, con un régimen de cizalla rotacional, geometría Mk 24/70, con baño recirculador para el control de temperatura (10, 25 y 35 °C). Software Physica US 200, para la determinación de los parámetros.

Se realizaron tres mediciones para el mismo intervalo de velocidad de cizalla, (0.5 -400 s<sup>-1</sup>/log) a las temperaturas de estudio.

La variación de las propiedades reológicas cuando la temperatura aumenta permite observar que la viscosidad aparente disminuye, en función de la velocidad de cizalla.

Los coeficientes de correlación y de determinación (Cuadro 2, 6 y 16) validan el comportamiento reológico, en base en la Ley de Potencia (pág 27). Las muestras analizadas, presentan un comportamiento adelgazante debido a que los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) son menores de 1. Además se observa que el modelo de Ostwald-De Waale presenta valores de 0.916 a 0.999 de coeficiente de correlación ( $R$ ), lo que confirma el comportamiento reológico de tipo pseudoplástico de los productos. (Sherman 2003, Lewis 1993, Rao 1999, Muller 1978)

El seguimiento de los parámetros reológicos en función de un tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, muestra variaciones de  $k$  y  $n$  sin embargo, no es indicativo de alguna tendencia definida.

El análisis estadístico (anova de un sólo factor), permite determinar si hay diferencias significativas entre los valores de  $k$  y  $n$ . **Si  $0.05 \leq P$** ; no existen diferencias significativas entre los grupos. Por el contrario, si ( $0.05 \geq P$ ) si existen diferencias significativas, esto es en base a la consistencia del productos ya que puede haber modificación en la estructura.

---

<sup>1</sup> Mayonesa (McCormick, La Costeña); yoghur (Lala, Alpura), y salsa cátsup (Del Monte, La Costeña y Clemente Jacques)

## INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos requiere conocer en detalle para cada producto que genera los cambios que ocurren en ellos desde la fase de fabricación al consumo. Para ello, es necesario realizar análisis reológicos que proporcionen las propiedades de flujo de fluidos, suspensiones, semisólidos alimenticios cuando permanecen estables y cuando pasan de una etapa a otra del proceso industrial, permitiendo establecer parámetros reológicos en sus procesos y establecer un control de calidad.

La reología puede describir el comportamiento de un alimento, de acuerdo a la composición de éste, puede requerir o no de un nivel de esfuerzo inicial para fluir. Al someter una muestra de material a un estudio de deformación, el comportamiento de flujo de la materia puede proporcionar información cualitativa y cuantitativa para caracterizarla a partir de sus parámetros reológicos.

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia y contribuye a clasificar la naturaleza de los sistemas coloidales (Macosko, 1994). Es parte de la física y estudia el comportamiento de diferentes fluidos (de líquidos a sólidos), sus características (viscosidad, elasticidad, estabilidad y suspensión), así como sus deformaciones al someterse a cambios de temperatura, humedad o de algunos componentes.

Las propiedades reológicas de los productos son importantes para su aceptación por los consumidores, éstas permiten observar la estabilidad de la emulsión durante su vida de anaquel.

Para la caracterización cuantitativa de las propiedades reológica, se emplean los reómetros los cuales permiten determinar el comportamiento fluido-mecánico y parámetros como viscosidad, propiedad del fluido y las características de un líquido, de semisólidos y a veces algunos sólidos.

Entre las propiedades de las soluciones coloidales destaca la viscosidad, es decir, la resistencia al flujo. Los líquidos cuyas moléculas tienden a asociarse en conglomerados más grandes son más viscosos, en comparación con las moléculas polares (agua).

# **OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

Realizar un estudio de las propiedades reológicas de algunos productos alimenticios (mayonesa, yogur, salsa cátsup), con base en sus curvas de flujo para determinar la variación de sus propiedades en función de la temperatura, durante un periodo de vida de anaquel.

## **Objetivos particulares**

- Estudiar la influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de los productos comerciales seleccionados (salsa cátsup, mayonesa, yogur)
- Determinar el cambio de las propiedades reológicas, con base en los reogramas durante un periodo de vida de anaquel
- Establecer si hay diferencias significativas en el comportamiento reológico de los productos comerciales, entre marcas del mismo producto
- Inferir el tipo de comportamiento reológico en los productos, durante un periodo de vida de anaquel

# **1 GENERALIDADES**

Con base en la composición y estructura, un alimento puede ser un sistema: multicomponente, multifásico o multicompartimentado.

## **1.1 Multicomponente**

El componente mayoritario en los alimentos es el agua (en frutas y vegetales es superior al 95%). Tienen además macrocomponentes como proteínas, hidratos de carbono y microconstituyentes (vitaminas, sales minerales, colorantes).

## **1.2 Multifásico**

La mayoría de los alimentos tienen varias fases no miscibles. Cada fase tiene una determinada composición. Debido a la anisotropía de fuerzas de interacción entre los componentes de las distintas fases, las interfases poseen propiedades peculiares. Allí se da una acumulación de sustancias de carácter anfifílico (cierta proporción de carácter polar y no polar), que contribuye a las propiedades globales del sistema (Martínez, 1999).

Por ejemplo, una mayonesa está constituida por dos fases: una continua acuosa formada por agua y compuestos hidrosolubles (sal, azúcar, ácido acético, proteínas solubles del huevo, entre otros), y otra dispersa constituida por grasa formada por material lipídico. En la interfase se acumula el material emulsionante responsable de la estabilidad del sistema.

## **1.3 Multicompartimentado**

Los tejidos vegetal y animal están constituidos por subsistemas (células) separados por barreras físicas con actividad química, que permiten el transporte selectivo de materia entre dichos subsistemas. Estas barreras poseen permeabilidad selectiva a diferentes componentes y su comportamiento es complejo.

La mayoría de los alimentos no están en situación de equilibrio y a lo largo del tiempo se dan cambios en la composición de sus diferentes fases.

Desde el punto de vista de su exposición con el exterior, es conveniente, considerar el sistema alimento-entorno. Este sistema estará formado por el alimento (sólido o líquido) por su entorno próximo, estando ambos confinados

en un determinado volumen. Este entorno puede ser gaseoso (el gas espacio de cabeza de un envase) o líquido (el líquido de gobierno de una conserva).

### **1.3.1 Sistema cerrado**

Corresponde a los casos en que el sistema alimento-entorno no intercambia materia con los alrededores, o no es significativo para el sistema; esto puede observarse en un alimento envasado en paquete hermético (papas fritas). A tiempos cortos, cuando la limitada permeabilidad del envase no se ha hecho patente. En estos casos puede haber transferencia de masa dentro del sistema, por ejemplo en un producto de bollería con un relleno de alta humedad, envasado en un material impermeable al agua y oxígeno atmosféricos. (Martínez, 1999)

### **1.3.2 Sistema abierto**

Hay intercambio de materia entre el sistema y los alrededores. Desde el punto de vista práctico, la composición de estos últimos no cambia significativamente. Ejemplo: unas galletas (sistema) expuestas al aire (alrededores). En estos sistemas abiertos la condición de equilibrio material tiene que extenderse a los alrededores.

Un zumo es un sistema multifásico con una fase continua acuosa y una pequeña proporción de fases dispersas sólidas. La *fase acuosa* es una disolución de azúcares, sales y otros solutos de bajo peso molecular, junto a otros solutos de alto peso molecular como proteínas solubles o pectinas. La *fase dispersa* está constituida por biopolímeros insolubles (almidón, proteínas insolubles, celulosa) y partículas sólidas que son restos del material estructural (paredes celulares) de composición compleja (Fig. 1.1).

Si el zumo está envasado, el sistema alimento-entorno será cerrado y estará constituido por el alimento-zumo y el entorno es el espacio de cabeza del envase (vapor en equilibrio con el zumo). Al abrir el envase es un sistema abierto: ahora el sistema puede definirse como el zumo que intercambia materia (agua) con los alrededores (aire ambiente). La composición de los alrededores no cambia significativamente como consecuencia de este intercambio.

El contenido total de agua y sus interacciones con el resto de componentes es un factor decisivo para la descripción del sistema en términos de un modelo físico simplificado. Esto es una primera fase para describir los fenómenos

físicos, como la transferencia de materia y la evolución del sistema en un determinado periodo correspondiente al proceso del alimento y su almacenamiento.

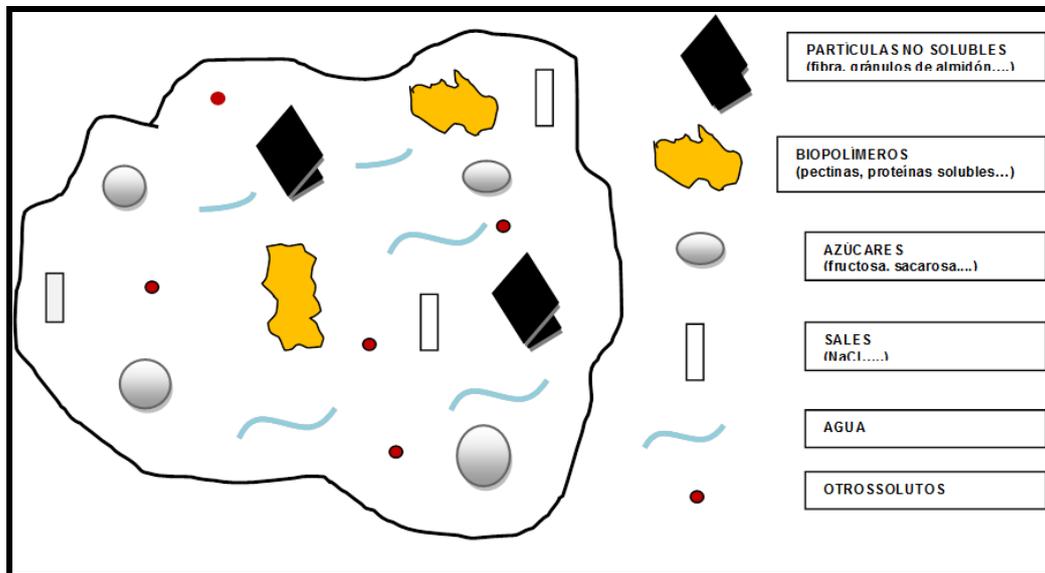


Figura 1.1. Modelo de un zumo de fruta (Martínez, 1999)

#### 1.4 Coloides

La estructura de los alimentos está definida por el acomodo a nivel micro y macroscópico de los constituyentes. Su grado de organización y estabilidad depende del nivel de cohesión entre sus componentes y de las fuerzas físicas y químicas que intervienen. A pesar de la complejidad estructural y la heterogeneidad de los alimentos, casi todos pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- Tejidos celulares intactos
- Dispersiones (coloides)

En el primer caso, las células animales o vegetales están unidas entre sí por medio de membranas y/o agentes ligantes. Por ejemplo, un músculo tiene como unidad estructural la célula muscular o fibra muscular individual. (Badui, 2013)

Una dispersión o coloide es un sistema de multifases no homogéneas en equilibrio y consta de una o más fases dispersas o discontinuas, llamadas micelas, contenidas en una fase continua. Las propiedades de una dispersión o coloide son diferentes a las que presentan los componentes de cada fase por separado o en una solución verdadera. Un criterio importante para definir un

sistema coloidal es el tamaño de las partículas de la fase dispersa o micelas. Se considera que las partículas coloidales están en un rango de tamaño de  $10^{-9}$  a  $10^{-6}$  m (1 nm a  $\mu\text{m}$  o  $\mu$ ), por ejemplo:

- Las soluciones verdaderas tienen partículas con un tamaño menor a 1nm.
- Las dispersiones gruesas (partículas separables por sedimentación o filtración ordinaria) tienen un tamaño d partícula mayor a 100 nm ( $0.1\mu\text{m}$ ).

La amplitud del rango del tamaño de partículas que forman coloides se debe al medio o fase continua en la que se encuentran dispersas. Los coloides poseen carga eléctrica positiva o negativa. La carga de las micelas en un coloide tiene el mismo signo y tienden a repelerse entre sí, lo que evita su agregación y facilita que se mantengan en suspensión y distribuidas de una manera casi uniforme en la fase dispersante o continua. La unión de las partículas de la fase dispersa se denomina coalescencia.(Badui, 2013)

#### **1.4.1 Clasificación de los coloides**

Los coloides se clasifican de dos maneras, con base en:

- a) La afinidad entre las partículas de las fases que integran al coloide
- b) El estado físico de los componentes de la dispersión coloidal

La primera clasificación considera la afinidad de las superficies de las partículas de la fase dispersa con las partículas de la fase dispersante.

En cuanto a la afinidad de las fases, los coloides se denominan liofílicos (afinidad por el líquido dispersante) y liofóbicos (repelen al líquido dispersante). Si la fase continua o líquido dispersante es agua, se utilizan los términos hidrofílico e hidrofóbico, respectivamente. La característica común de ambos es que las micelas se mantienen en suspensión por interacciones electrostáticas con las partículas de la fase dispersante.

Los coloides liofílicos están constituidos por moléculas grandes que contienen, como parte de su estructura química, grupos funcionales que pueden formar enlaces electrostáticos con las moléculas de la fase dispersante. Por ejemplo, las proteínas hidrosolubles pueden formar coloides en agua debido a la formación de puentes de hidrogeno. El puente de hidrogeno permite a la molécula de la fase dispersa solvatare, es decir, rodearse de las partículas de

la fase dispersante, y simultáneamente permite que la molécula permanezca en dispersión sin precipitarse, ya que no puede agruparse con otras molécula.

En los coloides liofóbicos las interacciones electrostáticas entre las partículas de las fases dispersas y dispersante se deben a tracciones entre cargas opuestas que mantienen la estabilidad de la dispersión. La fase dispersa se rodea en su superficie externa de una capa de carga opuesta a la de la fase dispersante.

La segunda clasificación se basa en las características físicas de cada una de las fases. Para sistemas de fases no miscibles, los coloides se clasifican en ocho categorías, (Cuadro 1.1).

Clasificación de sistemas coloidales de dos fases			
Fase dispersa	Fase dispersante	Nombre	Ejemplos
Sólido	Sólido	Sol sólido	Dulces y caramelos
Líquido	Sólido	Emulsión sólida	Mantequilla, margarina, chocolate (el agua es la fase dispersa)
Gas	Sólido	Sol	Suero de leche, soluciones de proteínas, leche descremada
Sólido	Líquido	Sol	Suero de leche, soluciones de proteínas, leche descremada
Líquido	Líquido	Emulsión	Leche, aderezo para ensaladas, mayonesa, crema
Gas	Líquido	Espuma	Crema batida, espuma de cerveza, merengues, malvaviscos, miga de pan, pasteles.
Sólido	Gas	Aerosol sólido	Humo para saborizado de alimentos, leche en polvo secada por atomización
Líquido	Gas	Aerosol líquido	Nieblas

Cuadro 1.1. Clasificación de sistemas coloidales de dos fases (Badui, 2013)

En algunos casos, dada la heterogeneidad natural de los alimentos, los ejemplos mostrados no son coloides estrictos, ya que pueden contener más de dos fases y/o tipos de partículas con tamaños mayores o menores a los coloidales (leche), pero para sus análisis es útil considerar a estos alimentos como coloides simples. Los siete primeros tipos de coloides son importantes en la industria de alimentos y cubren una amplia gama de productos. Sin embargo, por su interés químico sobresalen las espumas sólidas, soles y emulsiones.

#### 1.4.2 Espumas

Son dispersiones coloidales de un gas, o mezcla de gases suspendidos en una fase dispersante formada por un líquido viscoso o un semisólido (Fig. 1.2). En la mayoría de las espumas alimenticias el gas es aire. El líquido rodea a las burbujas de aire y las separa una de la otra. Esta barrera o pared líquida recibe

el nombre de lamela. Existe una gran área superficial en las burbujas de una espuma, lo que aumenta su energía libre de Gibbs. Si la espuma es estable, debe existir una disminución de la tensión superficial entre la lamela y el aire que la rodea. El diámetro de las burbujas de espuma varía de 1  $\mu\text{m}$  hasta varios cm. Para lograr estabilidad en las espumas, es necesario que el tamaño de las lamelas esté en el rango de 0.2 a 1  $\mu\text{m}$ ; si es menor de 0.5  $\mu\text{m}$  el sistema se vuelve muy inestable debido a que existe una difusión de gas a través de las paredes de las burbujas, lo que ocasiona su ruptura. Según el tamaño de las burbujas y del espesor de la lamela, una espuma tendrá casi la consistencia de la fase dispersante o será tan ligera como la fase gaseosa dispersa. (Badui, 2013)

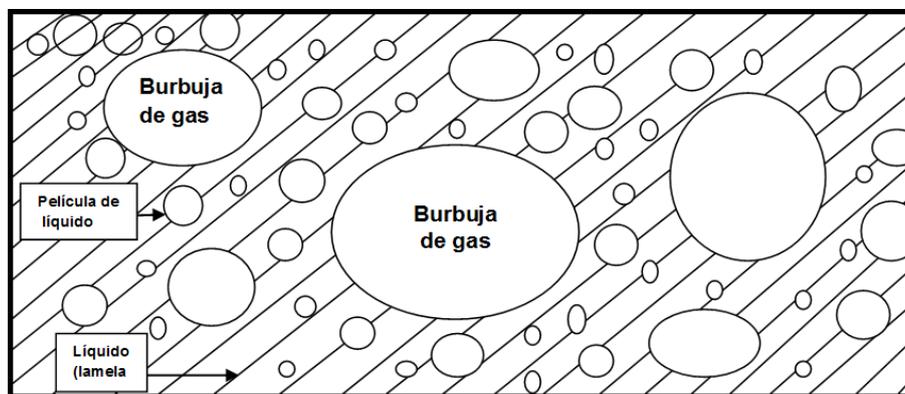


Figura 1.2. Esquema de la estructura de una espuma (Badui, 2013)

### 1.4.3 Soles

Un sistema coloidal muy común en los alimentos es el que forma una fase dispersa sólida en una fase dispersante líquida, al que se le denomina sol. En general, las partículas de la fase dispersa están constituidas por grandes macromoléculas tales como proteínas, polisacáridos y lípidos. En la industria de alimentos son más comunes los soles de tipo liofílico, como dispersiones simples de gomas, proteínas o pectinas, o dispersiones más complejas formadas por una fase dispersa de agregados o grupos de moléculas (micelas) dentro de una fase dispersante, como en el caso de la leche descremada o la yema de huevo.

### 1.4.4 Emulsiones

Se refiere a cualquier dispersión de un líquido en otro, los líquidos deben de ser inmiscibles. El agua es uno de los componentes más comunes y el otro es usualmente un aceite o algún otro líquido lipofílico. Los glóbulos del líquido

dispersados son generalmente entre 0.1 y 10  $\mu$  de diámetro y mayores que las partículas que constituyen los soles. Esta emulsión es termodinámicamente inestable y, al dejarla reposar algún tiempo, las gotas se agregan pasando primero por el estado conocido como floculación para luego producir la coalescencia y por último la separación de dos fases inmiscibles y diferenciables. La *floculación* es la unión de las gotas pequeñas de fase dispersa con sus bordes distintivos, y la *coalescencia* es la formación de una gota mayor sin los borde de las gotas individuales que han floculado (Fig. 1.3).

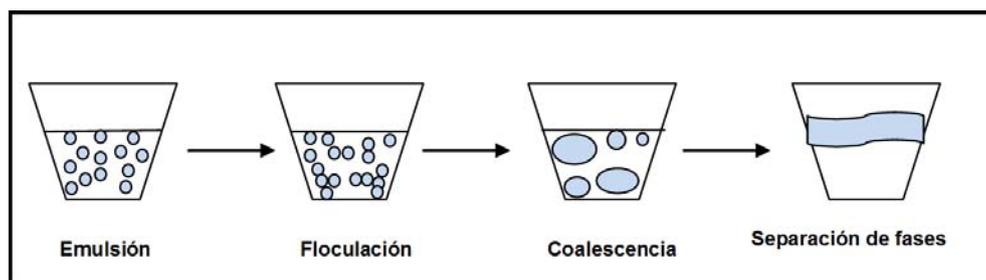


Figura 1.3. Esquema de los procesos de floculación, coalescencia y separación en dos fases de una emulsión (Badui, 2013)

En casi todas las emulsiones, una de las fases es acuosa y la otra es un aceite. Si el aceite es la fase dispersa, la emulsión se denomina emulsión de aceite en agua ( $O/W^2$ ), si el medio acuoso es la fase dispersa, la emulsión será de agua en aceite ( $W/O$ ). En la industria de alimentos son más comunes las emulsiones de tipo  $O/W$ , como mayonesa, aderezos para ensaladas, leche, crema, base para helados y sustitutos de crema para café. Los ejemplos de emulsiones  $W/O$  son más escasos y los alimentos más representativos son la mantequilla y margarina. Hay diversos criterios para identificar el tipo de emulsión:

- a) Una emulsión  $O/W$  tiene una textura cremosa y la  $W/O$  es grasosa al tacto
- b) La emulsión se mezcla fácilmente con líquidos que son miscibles con el medio de dispersión
- c) Las emulsiones se colorean con facilidad con tintes que son solubles en el medio de dispersión
- d) La conductividad eléctrica, generalmente es mayor en emulsiones  $O/W^3$  que en las  $W/O$

En los alimentos, las emulsiones no sólo están formadas por las dos fases, sino que contienen partículas sólidas y burbujas de gas, como en el caso de los

<sup>2</sup> Las siglas  $O/W$  provienen del anglicismo Oil/Water.

<sup>3</sup> La fase  $O/W$  tiene mayor parte Hidrófoba (lipófila, apolar) y la fase  $W/O$  Hidrófila (lipófoba, polar).

helados. Asimismo, el estado físico de las emulsiones va del líquido al sólido, pasando por el semisólido. Muchas de las partículas presentes en las emulsiones alimenticias pueden favorecer la estabilidad o, por el contrario, ser una causa potencial de coalescencia o cambios de estado físico. Por ejemplo, los iones calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), comunes en emulsiones lácticas, así como muchas proteínas, pueden interactuar con las moléculas adsorbidas en la película superficial de las gotas de la emulsión y causar inestabilidad como floculación (rompimiento de la emulsión) o relación (cambios de estado físico). La temperatura alta favorece estos procesos de desestabilización: por ejemplo, las proteínas tienden a desnaturalizarse y causar una floculación y/o gelación de la emulsión original. (Duncan, 1970)

#### **1.4.4.1 Agentes emulsionantes y estabilidad de emulsión**

La estabilidad de la emulsión, hace referencia a dos fenómenos esencialmente diferentes, que son: formación de nata o sedimentación y la destrucción de la emulsión debida a la coalescencia de las gotículas.

La formación de nata aparece por una diferencia de densidad entre las dos fases y no va acompañada necesariamente de una agregación de gotitas, aunque esto facilita el proceso.

Las colisiones entre gotitas pueden producir floculación, que a su vez, puede conducir a la coalescencia con formación de glóbulos mayores. La fase dispersa se convierte en una fase continua separada del medio de dispersión por una sola interfase. El tiempo necesario para que tenga lugar esta separación de fases puede ser desde unos segundos a varios años, según la formación de la emulsión y las condiciones de preparación.

Para obtener emulsiones razonablemente estables hay que tener un tercer componente, un agente emulsionante. Las sustancias que son más efectivas como agentes emulsionantes y (espumantes) se clasifican en:

- a) Sustancias con actividad superficial
- b) Materiales de origen natural
- c) Polvos finos de sólidos

Las funciones de un agente emulsionante son facilitar la formación de emulsión y promover la estabilidad de la misma. Estos agentes forman una película adsorbida alrededor de las gotitas dispersadas que contribuyen a evitar la floculación y la coalescencia. Los factores que favorecen la estabilidad de una

emulsión dependen de la naturaleza del agente emulsionante y de la elección apropiada de las condiciones de formulación y manufactura, entre ellos:

- a) Tensión interfacial baja. La adsorción de un surfactante a una interfase aceite-agua produce una disminución de la energía interfacial, con lo cual se facilita el desarrollo de esta y favorece la estabilidad de grandes áreas interfaciales asociadas con las emulsiones. Sustancias como gomas y sólidos muy pulverizados también tienen efectos estabilizadores de emulsiones importantes, aunque a estos no se les conoce claramente una naturaleza anfifílica
- b) Una película interfacial mecánicamente fuerte. La estabilidad de las emulsiones que tienen proteína como estabilizante, proviene de la protección mecánica que les dan las películas adsorbidas alrededor de las gotitas, más que de la reducción de la tensión interfacial. Los sólidos pulverizados, para los que el ángulo de contacto de  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , tiende a acumularse en la interfase aceite agua, donde le da estabilidad a la emulsión. Los surfactantes también estabilizan en el aspecto mecánico. La coalescencia implica la floculación de gotitas seguidas de una exclusión de la sustancia de la película protectora de la región de contacto entre estas y el medio dispersante, esto último es más fácil con una película expandida que con una empaquetada de modo compacto. Las emulsiones preparadas con sulfato de cetilo sódico más alcohol oleico, que dan una monocapa mixta expandida, son menos estables.
- c) Repulsiones de doble capa eléctrica
- d) Relaciones de volúmenes de las fases apropiadas
- e) Tamaños de partículas pequeños
- f) Viscosidad alta. Una viscosidad newtoniana alta retrasa sencillamente las velocidades de formación de nata, coalescencia.

La estabilidad de las emulsiones depende principalmente de dos factores:

- a) Espesor y compactibilidad de la partícula protectora (capa de la interfase), y
- b) Carga eléctrica de las gotas de la película

El poder emulsificante de los polvos finamente divididos depende de cómo sean humedecidos por los líquidos. En las condiciones humidificantes más

adecuadas, las gotas son rodeadas por una capa de las partículas del sólido, el cual previene así la coalescencia, (Fig. 1.4).

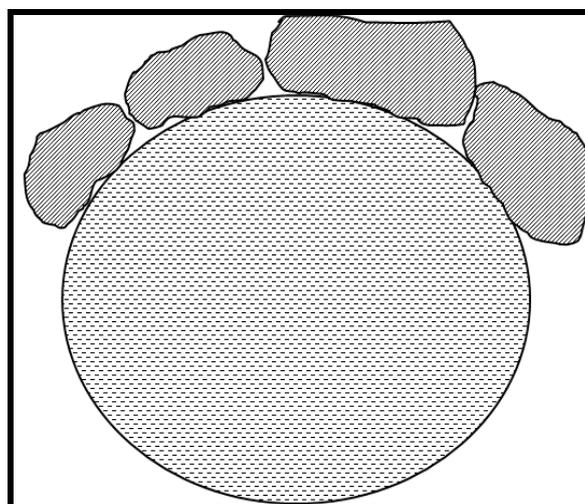


Figura 1.4. Estabilización de una gota por una capa de partículas sólidas (Martínez, 1999)

Las emulsiones y las espumas son las dispersiones más inestables, debido a la elevada tensión superficial entre aceite y agua, sólo se dan en presencia de un estabilizador eficiente que aparece de forma natural o agregándolo de forma artificial, siendo compuestos particularmente eficientes los mono y diglicéridos, polisorbatos, algunas proteínas, fosfolípidos y ésteres de sacarosa o de otros azúcares.

## 1.5 Características de los productos comerciales.

### 1.5 1 Mayonesa

En la Norma Oficial Mexicana (NMX-F-021-S-1979), se establece que la Mayonesa es un producto alimenticio obtenido por la emulsión cremosa que se obtiene con aceites vegetales comestibles, yema de huevo líquido o su equivalente en cualquiera de sus formas, vinagre, jugo de limón, sal, acidulantes permitidos, mostaza, extractos y aceites esenciales. El contenido de aceite vegetal comestible no será menor de 65% en peso y de yema de huevo líquida de 6% o su equivalente en yema de huevo deshidratada o, huevo entero líquido o deshidratado.

La mayonesa es una emulsión de aceite en agua, a pesar de que contiene una alta proporción de aceite (70-75%). La estabilización de esta gran cantidad de fase lipídica discontinua, en tan poca fase acuosa continua, demanda muchos

cuidados en la formulación, la emulsificación y las condiciones de procesamiento. La emulsión se logra empleando de un 7-8% de yema de huevo y un 0.5-1.0% de harina de mostaza. El contenido de 28% de lecitina en la yema provee un potente agente emulsificante, aun cuando su colesterol tiene un efecto opuesto e inhibitorio; es decir, la lecitina sólo representa 2% de la fórmula, pero emulsifica esta gran cantidad de aceite. La mostaza finamente molida ayuda al establecimiento de una película interfacial que mantiene la emulsión. Otros ingredientes que pueden utilizarse son vinagre de un 10-12% y sal de 1-2%, los cuales se disuelven en poca agua, aproximadamente 4-7%, además de especias. Este producto alimento tiene una variedad de componentes (Cuadro 1.2), y es rico en vitaminas K y E.

COMPONENTE	CANTIDAD	COMPONENTE	CANTIDAD
Hierro	0.40 mg	Vitamina C	0 mg
Sodio	580 mg	Vitamina E	15.50 µg
Potasio	18 mg	Vitamina B6	0.10 mg
Zinc	0.10 mg	Vitamina B7	0.0 µg
Fosforo	48 mg	Vitamina B12	0.48 µg
Magnesio	4 mg	Vitamina A	36.17 µg
Carbohidratos	5.80 g	Vitamina B1	0.02 mg
Proteína	1.30 g	Vitamina B2	0.05 mg
Fibra	0.00 g	Vitamina B3	1.00 mg
Azúcar	2.70 g	Vitamina B5	0.46 µg
Grasa	75.60 g	Vitamina D	0.25 µg
Calcio	12 mg	Vitamina K	81 µg
Purinas	0.0 mg	Calorías	709 Kcal

Cuadro 1.2. Componentes de la mayonesa (composición porcentual)  
<http://alimentos.org.es/mayonesa-comercial>

### 1.5.2 Yogur

El yogur natural o leche búlgara es un producto lácteo preparado a partir de leche entera, parcial o totalmente descremada, enriquecida con extractos secos por medio de la concentración de ésta o agregando leche en polvo tratada térmicamente y coagulada biológicamente por la fermentación obtenida de la siembra en simbiosis de los fermentos lácteos *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*.

La leche usada para yogur se tiene que estandarizar a un cierto nivel de grasa y mayores contenidos de lactosa, proteínas, minerales y vitaminas; para eso se pueden añadir sólidos lácteos no grasos (leche deshidratada descremada,

suero de leche, etc.), de tal forma que la gravedad específica aumente de 1.03 g/ml a 1.4 g/ml y paralelamente los sólidos no grasos suben a 12%. También se añaden gomas, estabilizantes, saborizantes y edulcorantes. La pasteurización destruye la mayoría de la micro flora característica de la leche, lo que permite un campo libre para los cultivos lácticos que se añaden posteriormente; la interacción de la caseína  $\kappa$  y la  $\beta$ -lactoglobulina provocada por el tratamiento térmico controlado (85°C/25 minutos) y favorecida por el pH y la presencia de calcio, crea una nueva estructura que tiene una mejor capacidad de absorción de agua que dará como resultado un gel más firme y terso, de mayor viscosidad que no presenta sinéresis. La homogenización, después de la pasteurización, estabiliza la grasa en pequeñas partículas que previene el cremado durante la fermentación, y mejora la textura por la interacción entre las caseínas y los glóbulos de grasa.

En estas condiciones, la leche se inocula con diversos microorganismos lácticos que actúan de una manera sinérgica a 40-45°C. El ácido láctico, producido a partir de la lactosa, baja el pH hasta 5 donde comienza la formación del coágulo. El sabor y el aroma se deben al ácido láctico, además del acetaldehído, la acetona, el diacetilo y otros compuestos con grupos carbonilo.

Las propiedades físicas del yogur, son afectadas por su composición (Cuadro 1.3), y el tipo de procesamiento térmico, dentro de ellos la viscosidad aparente, es la capacidad de retención de agua e índice de hidratación proteica.

COMPONENTES	CANTIDAD
Calcio	415 mg
Hierro	0.18 mg
Magnesio	40 mg
Fósforo	326 mg
Zinc	2 mg
Vitamina C	1.8 mg
Vitamina B1-Tiamina	0.10 mg
Vitamina B2-Riboflavina	0.36 mg
Vitamina- B12 (ug)	12.8 mg
pH menor de	4.5 mg
Cuadro 1.3. Componentes del yogur (Composición porcentual) <a href="http://www.sabormediterraneo.com/salud/vogur_nutr.html">http://www.sabormediterraneo.com/salud/vogur_nutr.html</a>	

### 1.5.3 Salsa cátsup

La salsa de tomate cátsup<sup>4</sup>, producto elaborado con el jugo y pulpa de tomates (*Lycopersicon esculentum* L.) sanos, limpios, de madurez adecuada, concentrado y adicionado de vinagre, edulcorantes nutritivos, sal yodada, especias y condimentos opcionales se somete a un tratamiento térmico adecuado antes o después de envasarse.

#### 1.5.3.1 Propiedades de la salsa cátsup

Es un alimento rico en sodio, 100 g de salsa contienen 1120 mg de sodio y una variedad de nutrientes (Cuadro 1.4).

La salsa de tomate se encuentra dentro de las lista de los fluidos no newtonianos tales como las cremas batidas, la sangre, las emulsiones fotográficas, el esmalte de uñas, coloides, etc., se vuelve más viscosa cuando permanece inmóvil, y si se agita o bate, se vuelve menos viscosa.

Componente	Cantidad	Componente	Cantidad
Hierro	0.90 mg	Vitamina A	100 µg
Potasio	480.00 mg	Vitamina B1	0.06 mg
Zinc	0.10 mg	Vitamina B2	0.06 mg
Magnesio	19.00 mg	Vitamina B3	1.22 mg
Sodio	1120 mg	Vitamina B5	0.20 µg
Fósforo	40 mg	Vitamina B6	0.16 mg
Proteína	2.00 g	Vitamina B9	10 µg
Calcio	19 mg	Vitamina C	15 mg
Selenio	0.80 µg	Vitamina E	1.50 mg
Eq. Niacina	1.22 mg	Fibra	0.90 g
Azúcar	24.80 g	Calorías	117 kcal

Cuadro 1.4. Componentes de la salsa cátsup (composición porcentual)  
<http://www.dietas.net/tablas-y-calculadoras/tabla-de-composicion-nutricional-de-los-alimentos/salsas-y-condimentos/salsas/ketchup.html>

### 1.6 Factores de descomposición

Los alimentos pasan por una serie de etapas de descomposición progresiva, puede ser lenta o rápida y pueden inutilizarlos en unas horas. Los compuestos orgánicos presentes en los alimentos son lábiles a varios factores del medio

<sup>4</sup> El ketchup, también conocida como salsa de tomate en Colombia, Venezuela y Ecuador, cátsup, es una salsa de tomate condimentada con vinagre, azúcar y sal, además de diversas especias.

ambiente como calor, frío, luz, oxígeno, humedad, sequedad, enzimas naturales de los alimentos y tiempo, otros factores que la propician la son:

- a) Crecimiento y actividad de microorganismos (bacterias, levaduras, mohos)
- b) Actividad de las enzimas naturales
- c) Los insectos, parásitos y roedores
- d) Variaciones de temperatura
- e) Humedad y sequedad
- f) El aire, particularmente el oxígeno
- g) La luz

## 2. CONCEPTOS DE REOLOGÍA

### 2.1 Definición de reología

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia; explica cómo se comporta un material al aplicarle una fuerza y la manera en que éste se deforma o fluye como respuesta a este tratamiento.

### 2.2 El número de Débora

Reológicamente, la respuesta de un material a una fuerza aplicada, puede dividirse en dos comportamientos extremos: la deformación 100% elástica de un sólido y el flujo 100% viscoso de un líquido.

Un parámetro utilizado para caracterizar las sustancias de acuerdo a su comportamiento elástico/viscoso/viscoelástico es el número de Débora<sup>5</sup>.

El número de Débora es el tiempo de relajación (necesario para que fluya el material) o tipo de proceso. Cuanto más pequeño sea el número de Débora, el material es más fluido y cuanto mayor sea, más tenderá el producto a parecer un sólido, (Ec. 2.1).

$$N_{De} = \frac{t_{material}}{t_{proceso}} \quad (2.1)$$

Donde:

Número de Débora: ( $N_{De}$ )

$t_{material}$ : es el tiempo característico del material

$t_{proceso}$ : es el tiempo característico del proceso.

Según este parámetro, los sistemas se ajustan a:

$N_{De}>1$ : Deformación elástica. El material se comporta como un sólido.

$N_{De}<1$ : Flujo viscoso el material se comporta como un líquido.

$N_{De}=0$ : Respuesta viscoelástico.

Los fluidos no importa cuán viscosos sean, serán el producto del esfuerzo más pequeño.

Los sólidos no importa que tan plásticos sean requieren una cierta magnitud de esfuerzo antes de empezar a fluir.

### 2.3 Deformación

Al aplicar una fuerza cambia el tamaño o la forma de un cuerpo (y por lo tanto, el volumen), entonces se habrá provocado una deformación (Steffe, 1992). Cuando un objeto se somete a esfuerzos, una o más de sus dimensiones por lo

---

<sup>5</sup> Nombre que procede del antiguo testamento, según la cual "las montañas fluyen ante los ojos del Señor", introducido por el Dr. Reiner, uno de los fundadores de la Reología.

general cambia, la magnitud de este cambio dimensional es lo que se conoce como deformación absoluta. Así la deformación es una función tanto de la naturaleza del material como de sus dimensiones. A fin de tener una propiedad que dependa únicamente del material, se define a la deformación como la magnitud de cambio dividido entre la dimensión original. Puesto que la deformación es siempre la razón de dos longitudes, siempre es adimensional (Sharma, 2003).

Considerando una barra rectangular que debido a una fuerza de tensión es ligeramente alargada (Fig. 2.1), si el largo inicial de la barra es  $L_0$  y después del alargamiento es  $L$ ; donde  $\Delta L$  representa el incremento de la longitud (Ec. 2.2).

$$L = L_0 + \Delta L \quad (2.2)$$

Esta deformación puede ser considerada en términos de deformación de Cauchy como:

$$\epsilon_c = \frac{\delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (2.3)$$

O deformación de Hencky (deformación verdadera):

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.4)$$

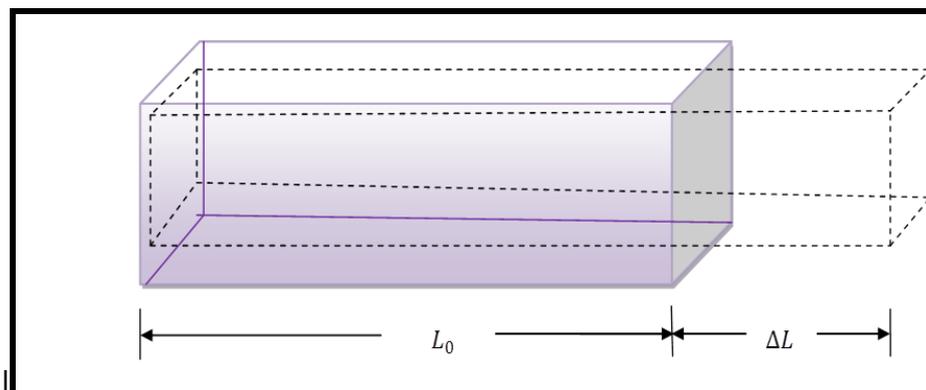


Figura 2.1. Alargamiento lineal de una barra rectangular (Steffe, 1996)

Otro tipo de deformación fundamentado en reología es la de cizalla simple. La idea puede ser ilustrada con una barra rectangular de altura  $h$  (Fig. 2.2). La

superficie inferior es estacionaria y en la placa superior se aplica una fuerza provocando que sea linealmente desplazada por una cantidad igual de  $\Delta L$ . Cada elemento es expuesto al mismo nivel de deformación, de esta manera, el tamaño del elemento no es relevante (Steff, 1992) y se establece un ángulo de cizalla  $\gamma$ , (Ec. 2.5).

$$\tan(\gamma) = \frac{\delta L}{h} \quad (2.5)$$

Con pequeñas deformaciones, el ángulo de cizalla es igual a la deformación bajo cizalla (Steffe, 1992).

$$\tan(\gamma) = \gamma \quad (2.6)$$

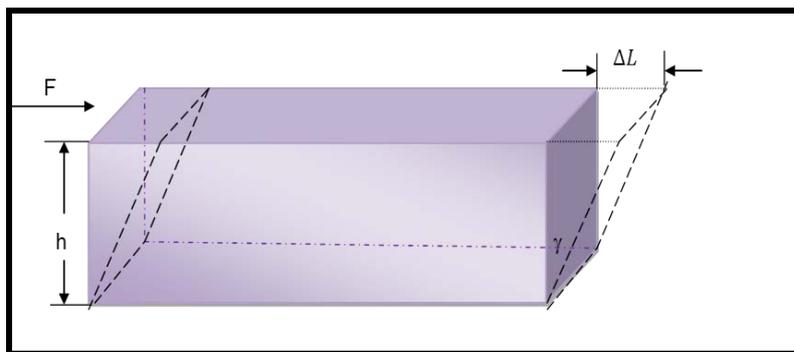


Figura 2.2. Deformación de cizalla de una barra rectangular (Steffe, 1996)

## 2.4 Esfuerzo de cizalla o de corte

Cuando un par de fuerzas son paralelas pero no ocurren a lo largo de un eje común, el efecto es que el objeto se tuerce a un lado. Si la parte superior de un objeto rectangular se jala hacia la derecha mientras que la inferior se jala hacia la izquierda (Fig.2.3), el objeto se convierte en un paralelogramo. Este tipo de esfuerzo se conoce como esfuerzo de corte, (Ec. 2.7)

$$\text{Esfuerzo de corte} = (\sigma) = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

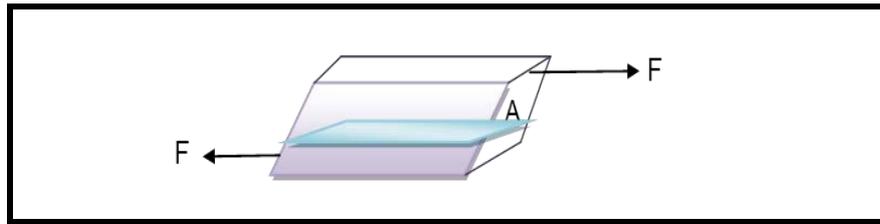


Figura 2.3. Principio del esfuerzo de corte (Sharma, 2003)

## 2.5 Deformación de corte

La deformación de corte (Ec. 2.8), es una distorsión que ocurre cuando las fuerzas opuestas no están alineadas entre sí; y es igual a la tangente del ángulo de deformación causada por el esfuerzo de corte (Fig. 2.4).

$$(\gamma) = \frac{\Delta L}{L} = \tan(\theta) \quad (2.8)$$

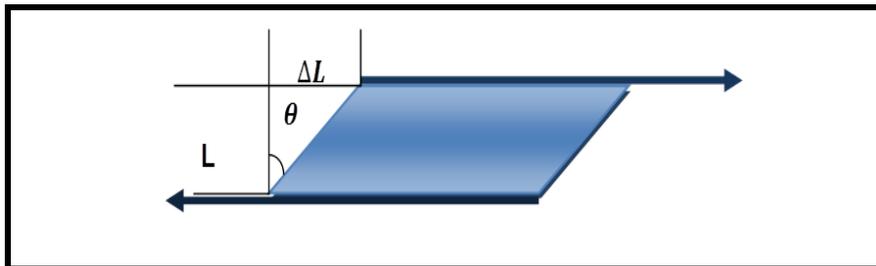


Figura 2.4. Principio de la deformación de corte (Sharma, 2003)

## 2.6 Velocidad de cizalla o corte

Es el de gradiente de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), definido como la variación de velocidad de un elemento de fluido con relación a la variación en distancia. A este gradiente se le denomina también velocidad de deformación en cizallamiento, de velocidad cizallamiento, velocidad de corte, o tasa de deformación. El gradiente de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) depende del tipo de perfil de velocidad presente en el flujo.

$$\text{Esfuerzo de corte} = (\sigma) = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

La velocidad de corte es el cambio de velocidad y a través de la distancia **h** entre los dos platos en  $\text{segundo}^{-1}$ . La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad del plato superior aumenta y la distancia entre los dos platos se hace más pequeña.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh} = \frac{\frac{cm}{s}}{cm} = s^{-1} \quad (2.10)$$

El flujo entre los platos resistentes, el movimiento del plato superior y la resistencia al flujo es determinado por la viscosidad del fluido.

## 2.7 Viscosidad

La viscosidad (Ec. 2.11) es la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte adoptada por el flujo ( $\text{Pa s}^{-1}$ ).

$$\eta = \frac{\tau(\text{Esfuerzo de corte})}{\dot{\gamma}(\text{Velocidad de corte})} \quad (\text{Pa s}^{-1}) \quad (2.11)$$

## 2.8 Modelos reológicos.

Los fluidos alimentarios pueden clasificarse con base en su comportamiento reológico, (Fig. 2.5), y pueden tener un comportamiento característico de acuerdo a sus reogramas (Fig. 2.6).

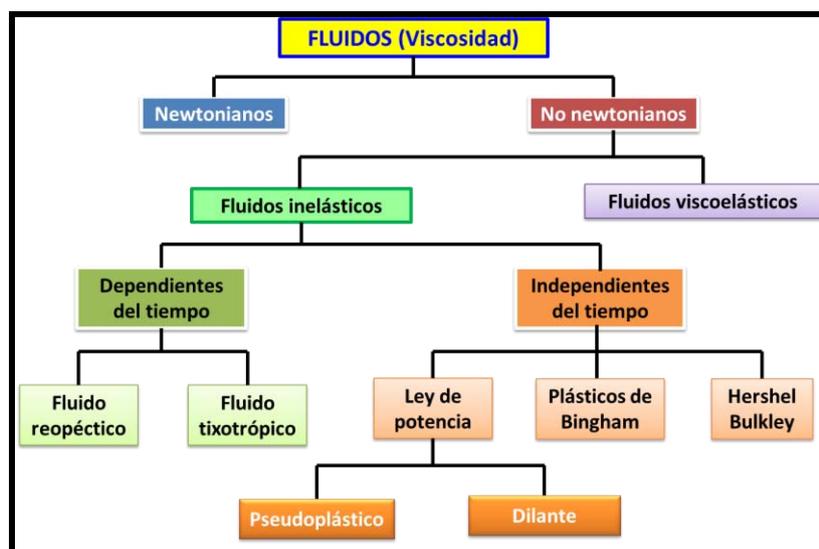


Figura 2.5. Clasificación de los fluidos no newtonianos (Alvarado, 2001)

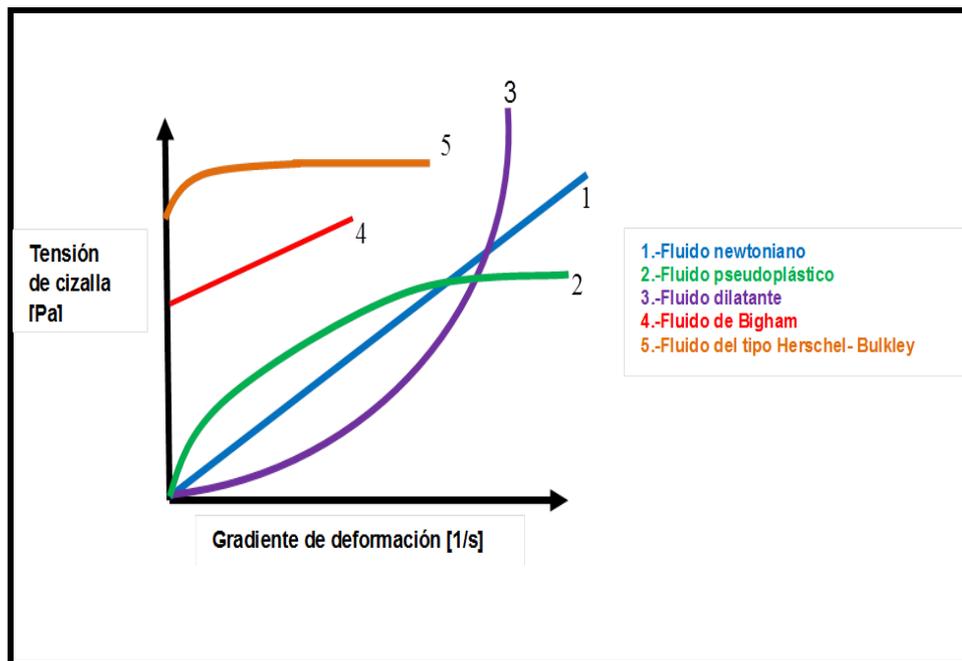


Figura 2.6. Reograma de flujos típicos en la industria de alimentos (Alvarado, 2001)

## 2.9 Fluidos newtonianos

El comportamiento de la viscosidad de un fluido newtoniano<sup>6</sup> es constante y el esfuerzo de cizalla o de corte en función de la velocidad de deformación (o velocidad de corte) es una línea recta. La constante de proporcionalidad se le denomina viscosidad.

El líquido newtoniano es aquel material que su viscosidad es constante y la representación del esfuerzo de cizalla o de corte en función de la velocidad de deformación (o velocidad de corte) es una línea recta. A la constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de viscosidad. El líquido newtoniano se representa con el símbolo  $N$ .

El fluido newtoniano no posee propiedades elásticas, es incompresible, isotrópico y carente de estructura y es el material opuesto al sólido de Hooke.

El flujo de un líquido newtoniano suele ilustrarse gráficamente representando esfuerzo de corte  $\tau$ , o el coeficiente de viscosidad  $\eta$ , en función de la velocidad de deformación (velocidad de corte),  $\dot{\gamma}$ , (Fig. 2.7).

<sup>6</sup> El líquido newtoniano se representa con el símbolo  $N$ .

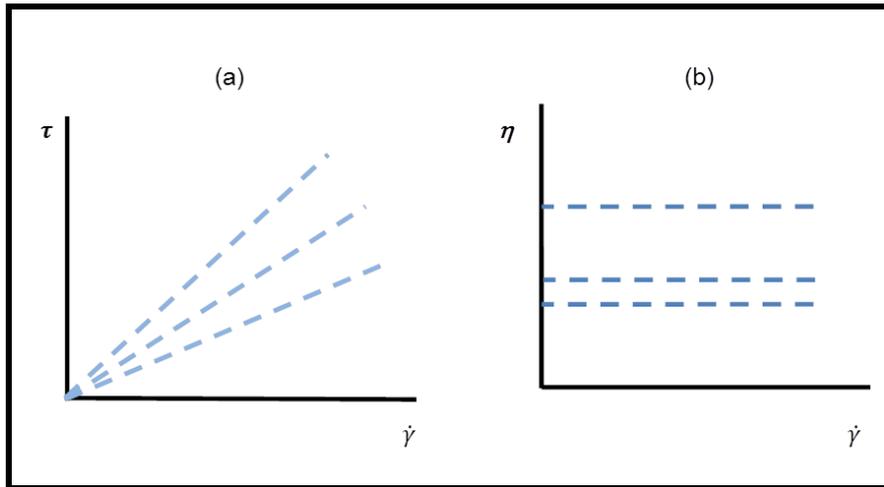


Figura 2.7. (a) Representación gráfica del esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) en función de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ )  
 (b) Representación del coeficiente de viscosidad  $\eta$  en función de  $\dot{\gamma}$  (Méndez, 2001)

En la curva (a) ilustra la relación lineal para un líquido viscoso (newtoniano). La viscosidad ( $\eta$ ) está dada por la pendiente y es independiente de la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ . Para deducir si un líquido, es o no newtoniano basta con observar si al duplicarse  $\tau$  se duplica también  $\dot{\gamma}$ . Si esto no sucede, el líquido es no newtoniano.

El esfuerzo tangencial es directamente proporcional a la velocidad de deformación, cumpliéndose la ley de la viscosidad de Newton (Ec 2.12)

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \quad (2.12)$$

En este tipo de fluidos la viscosidad sólo depende de la temperatura y composición, siendo independiente del tiempo, de la velocidad de deformación y de la historia previa del fluido, (Fig. 2.8).



Figura 2.8. Aceite de oliva:  
 ejemplo de fluido newtoniano

## 2.10 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos exhiben un flujo uniforme, y la relación del esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla no es constante, es decir, no se ajustan a la

ley de la viscosidad de Newton (Rao, 1999); la viscosidad no es constante y varía con respecto a las condiciones experimentales seleccionadas como velocidad de cizalla, tiempo de aplicación del esfuerzo, entre otros (Yang, 2003).

Para establecer el comportamiento de estos sistemas se requiere establecer la curva de flujo, ya que uno sólo no caracteriza la curva de flujo. En lugar del coeficiente de viscosidad  $\eta$ , se usa frecuentemente un “coeficiente de viscosidad aparente” ( $\eta_{app}$ ), (Ec. 2.13). La viscosidad aparente  $\mu_a$  no es una constante; depende del esfuerzo tangencial, y la velocidad de corte, (Fig. 2.9), y es igual a la fuerza de cizalla dividida entre el gradiente de cizalla.

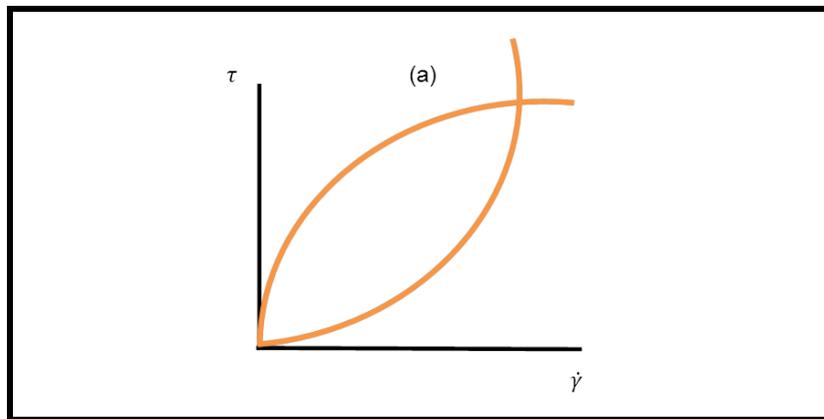


Figura2.9. Gráfica de un flujo no newtoniano (Méndez, 2001)

$$\eta_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.13)$$

La viscosidad y la acción cizallante dependen de factores como:

- La naturaleza de las fases continúa y dispersa.
- Las interacciones partícula-partícula y partícula-solvente.
- La concentración de partículas, su forma, tamaño y composición química.

### 2.10.1 Fluidos no newtonianos independientes del tiempo

Los fluidos independientes del tiempo se clasifican en tres categorías (Fig. 2.5), se caracterizan porque la viscosidad aparente no sólo depende de la temperatura y composición del fluido sino del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad aplicado, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último.

#### 2.10.1.1 Fluidos Plásticos de Bingham

Los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo cortante límite determinado, llamado esfuerzo de deformación plástica, umbral de fluencia o límite de fluencia  $\tau_0$ . En el caso de los fluidos plásticos de Bingham, una vez que se supera el valor del umbral de fluencia, la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo, como en el caso de los fluidos newtonianos. Estos fluidos exhiben propiedades de líquido a esfuerzos superiores al umbral de fluencia por lo tanto pueden ser clasificados tanto como líquidos como sólidos.

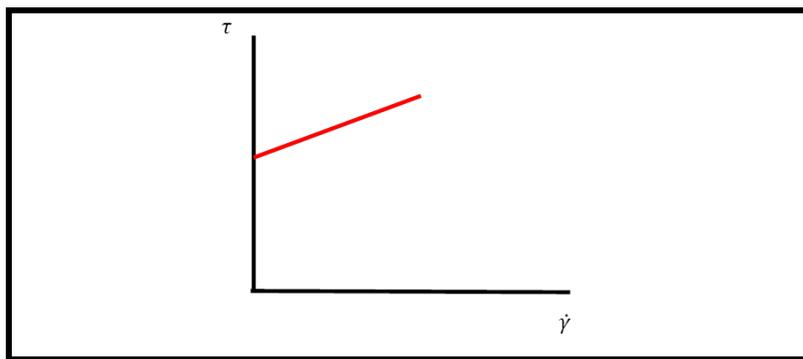


Figura 2.10. Gráfica lineal de un fluido plástico de Bingham (Méndez, 2001)

Este fluido plástico, se define normalmente en términos de un umbral de fluencia  $\tau_0$  y una viscosidad plástica  $\mu_p$ . Una de las características de este tipo de fluidos es que a bajas fuerzas de cizalla (por debajo de  $\tau_0$ ) se comportan como sólidos y no sufren deformación hasta que no se alcance una fuerza de cizalla (umbral) crítica. Más allá de este esfuerzo de cizalla el líquido fluirá.

Un plástico de Bingham muestra una relación directa entre la fuerza de cizalla y el gradiente de cizalla; la viscosidad plástica de este fluido viene dada por la pendiente de la línea recta (Fig. 2.10).

Algunos ejemplos de comportamiento plástico son el chocolate, la arcilla, la mantequilla, (Fig. 2.11), la pasta de dientes, las emulsiones, las espumas, etc.



Figura 2.11. La mantequilla es un ejemplo de fluido plástico

### 2.10.1.2 Ley de Potencia

En los sistemas dilatantes y pseudoplásticos, la relación  $\tau - \dot{\gamma}$  no viene expresada por la línea recta, sino que es única. A cada valor de  $\tau$  le corresponde un solo valor de  $(\dot{\gamma})$  (Fig. 2.12). Por esta razón, la gráfica se puede describir a veces matemáticamente empleando la dependencia de la viscosidad con respecto a  $\dot{\gamma}$  Ec. (2.14): (Méndez, 2001)

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (2.14)$$

Donde  $k$  y  $n$  son constantes;  $k$  se denomina *índice de consistencia* y  $n$  *índice de comportamiento de flujo*. Este último constituye una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Si:

- $n = 1$  el producto es newtoniano y  $k$  el coeficiente de viscosidad
- $n > 1$  el producto es dilatante y se produce un espesamiento
- $n < 1$ , el material es pseudoplástico y se produce un adelgazamiento

Se debe tener en cuenta que  $k$  proporciona una idea de la consistencia del producto, es una medida de la viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ), en  $Pa s^n$ . El índice de ley de la potencia ( $n$ ) da la desviación del comportamiento al flujo respecto al newtoniano. La expresión logarítmica de la ecuación 2.14 es 2.15.

$$\log \eta = \log k + (n - 1) \log \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

La gráfica de esta ecuación (Fig. 2.12), proporciona un comportamiento lineal y a partir de ésta se pueden determinar las constantes,  $n$  y  $k$ : la ordenada al origen es el  $\log k$  y la pendiente es igual a  $n - 1$ .

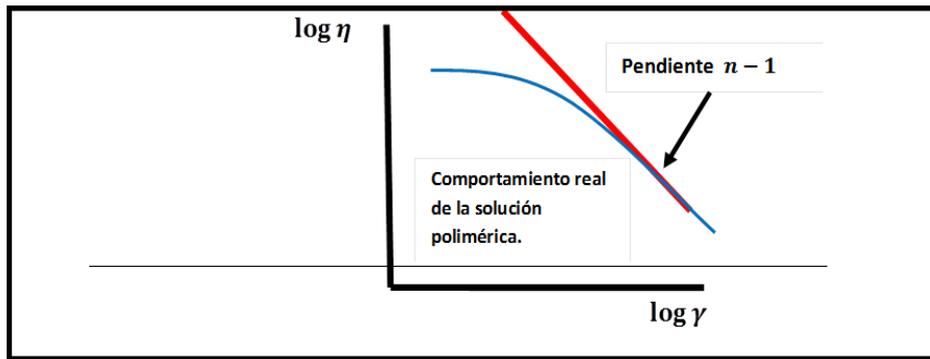


Figura 2.12. Representación gráfica de la Ley de la Potencia o de Ostwald-De Waele (Méndez, 2001)

En esta Figura 2.12 se observa el comportamiento de log de la viscosidad con respecto a log de velocidad de corte para un fluido pseudoplástico. Se indica que el comportamiento de la Ley de la Potencia puede ser diferente. Es importante indicar el intervalo de velocidad de corte para el cual se calculó  $n$  y  $k$ . La ley de potencia debe usarse sólo si previamente se ha demostrado experimentalmente que el comportamiento del producto no depende del tiempo. (Méndez, 2001)

### 2.10.1.3 Fluidos Pseudoplásticos

Los líquidos pseudoplásticos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizallan lentamente. La viscosidad aparente depende de la velocidad de deformación por cizalladura, pero no del tiempo durante el que están sometidos al esfuerzo de corte. (Méndez, 2001)

Estos fluidos se caracterizan por una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación (Fig. 2.13). El gráfico  $\tau$  en función de  $\dot{\gamma}$  no es una línea recta, donde **N** significa newtoniano y **P**, Pseudoplástico. La velocidad de deformación aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo tangencial ( $\tau$ ), de manera que la viscosidad aparente descende a medida que aumenta la velocidad de deformación (velocidad de corte). A cada valor de  $\tau$  le corresponde otro de  $\dot{\gamma}$ , y a la inversa. Las flechas indican el incremento, o decremento, de la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ .

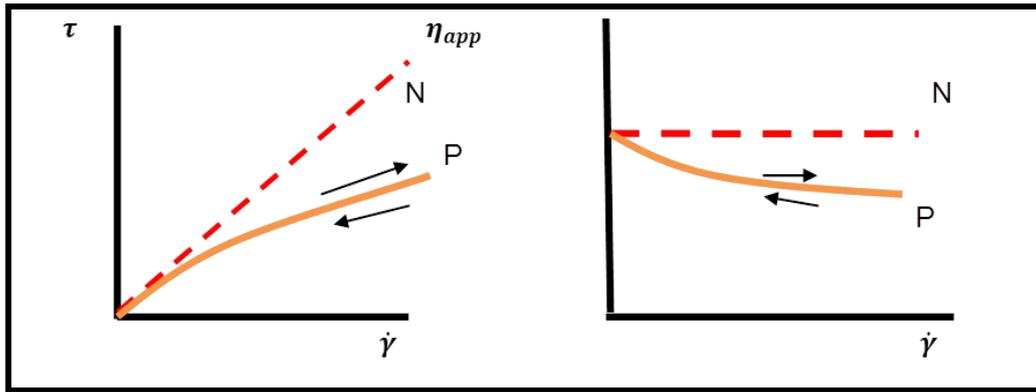


Figura 2.13. Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y un pseudoplástico (Méndez, 2001)

Este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo, y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular así como a la dispersión de sólidos en la fase sólida.

De los modelos utilizados para describir el comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos, el más conocido y simple es el de Ostwald-De Waale, (ley de la potencia (Ec. 2.14)).

El comportamiento pseudoplástico es, quizás, el más frecuente en los fluidos. Se comportan de esta forma muchos derivados de frutas y vegetales: zumos y purés de frutas, derivados del tomate, confituras de fruta; productos lácteos como la nata o la leche azucarada condensada, algunas sopas y salsas; la clara y yema de huevo; la mostaza francesa. Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de salsa cátsup, mostaza (Fig. 2.14), algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, etc.



Figura 2.14. La salsa cátsup y mostaza son ejemplos de fluidos pseudoplásticos

#### 2.10.1.4 Fluidos reoespesantes

Los fluidos reoespesantes al corte o dilatantes, presentan un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo en donde la viscosidad aumenta cuando el gradiente de deformación aumenta (lo contrario que ocurre en la pseudoplásticidad).

Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de deformación: (Méndez, 2001) En la figura 2.15 se muestra la gráfica que no es lineal, pero los valores de  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  están *unívocamente relacionados (espesamiento de estado estacionario)*. La viscosidad aumenta al aumentar  $\dot{\gamma}$ .

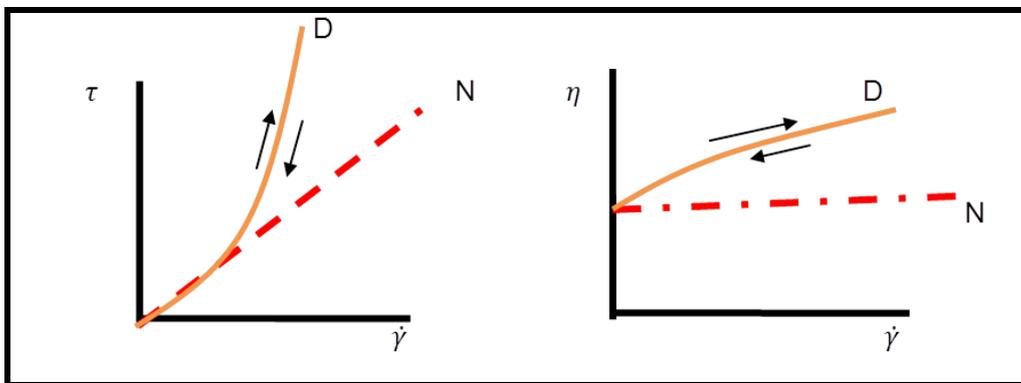


Figura 2.15. Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y un reoespesantes (Méndez, 2001)

**D** y **N** representan el flujo newtoniano y dilatante, respectivamente. La principal característica de este tipo de fluidos es que al aumentar la velocidad de deformación aumenta la viscosidad aparente.

La dilatación puede explicarse entendiendo que cuando las velocidades de deformación son bajas las partículas sólidas de formas y tamaños variados, están ceñidas y estrechamente empaquetadas y la fracción líquida está llenando los huecos y lubricando el movimiento, por lo que la viscosidad aparente es baja.

Con el aumento de la velocidad de deformación, las partículas largas y flexibles pueden estirarse rompiendo el empaquetamiento de los sólidos, la fracción de huecos entre las partículas aumenta, no habiendo suficiente líquido para lubricar el roce de unas partículas unas contra otras y hay un aumentando la viscosidad aparente.

La dilatancia es evidencia de una formación o reorganización de la estructura de la muestra, dando como resultado un aumento en la resistencia al aplicar una fuerza.

Ejemplos de fluidos dilatantes: la harina de maíz (Fig. 2.16), las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.



Figura 2.16. La fécula de maíz es un ejemplo de fluido reoespesantes (mezclada con agua da lugar a una masa, que se vuelve muy espesa al moverla)

### 2.10.2 Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo.

Son aquellos fluidos en los que la viscosidad aparente depende, además de la velocidad de deformación, del tiempo de actuación de dicha velocidad.

En este tipo de fluidos los parámetros reológicos y la viscosidad aparente varían a medida que transcurre el tiempo respecto del momento en el que se inició la aplicación de esfuerzo cortante. La viscosidad aparente disminuye al aumentar tanto el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante como su intensidad. Los alimentos no newtonianos con propiedades dependientes del tiempo se subdividen en fluidos:

- a) Tixotrópicos
- b) Reopéticos

Para los primeros, a una velocidad de deformación fija, la viscosidad disminuye con el tiempo de cizalla; para los últimos, la viscosidad aumenta con el tiempo.

#### 2.10.2.1 Fluidos tixotrópicos

La tixotropía consiste en un decremento continuo de la viscosidad aparente con respecto al tiempo, sin la recuperación de la viscosidad cuando el esfuerzo se suspende, en un corto tiempo. (Méndez, 2001)

La tixotropía es un ablandamiento dependiente del tiempo. Los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la ruptura de las cadenas que forman sus moléculas.

Dichos fluidos, una vez aplicado un esfuerzo cortante, sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Se consideran fluidos tixotrópicos a todos aquellos que al aplicarles una velocidad de deformación constante, muestran una disminución del esfuerzo cortante y de la viscosidad aparente con el tiempo. Esto es debido al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo (figura 2.17).

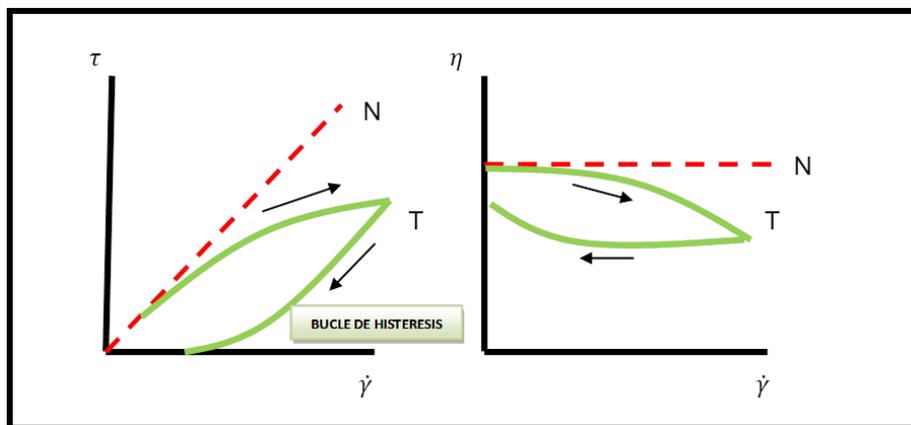


Figura 2.17. Gráfica comparativa de un flujo newtoniano y uno tixotrópico N y T representan los flujos newtoniano y tixotrópico (Méndez, 2001)

El descenso de  $\eta$  no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación, sino también con el tiempo (Fig. 2.17). Manteniendo constante la velocidad de deformación,  $\eta$  desciende con el tiempo, de manera que  $\eta$  no depende sólo de la velocidad, sino también del tiempo de deformación.

La representación gráfica de  $\tau$  en función  $\dot{\gamma}$  se obtiene aumentando  $\dot{\gamma}$  a intervalos definidos, hasta un máximo, y descendiendola luego del mismo modo hasta que alcance un valor de inicio. Es preciso mantener constante el intervalo de tiempo entre dos lecturas, al igual que las propias lecturas. Cuando la velocidad de deformación desciende, el producto se espesa lentamente, hasta reasumir su comportamiento original. Si las representaciones de  $\tau$  en función de  $\dot{\gamma}$  son dependientes del tiempo terminan formando un “bucle de histéresis”<sup>7</sup>

<sup>7</sup> El término histéresis se aplica al fenómeno del comportamiento elástico aplazado; la definición de histéresis es un proceso de deformación en el que las fases de carga y descarga no coinciden, produciendo un bucle.

Sin embargo, muchos alimentos tienen un comportamiento al flujo dependiente del tiempo pero su periodo de recuperación es muy largo o su estructura sólo es parcialmente recuperable. Por ello es más adecuado utilizar los términos "dependencia del tiempo en el flujo" o "destrucción estructural" para definir este tipo de comportamiento.

Ejemplos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogur (Fig. 2.18), las tintas de impresión, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc.



Figura 2.18. El yoghurt es un ejemplo de fluido tixotrópico

### 2.10.2.2 Fluidos reopécticos

La reopexia es el fenómeno inverso de la tixotropía: bajo esfuerzo, el producto se hace cada vez más viscoso, y tiende hacia el líquido desde que se relaja el esfuerzo. Los productos reopécticos son escasos. (Méndez, 2001)

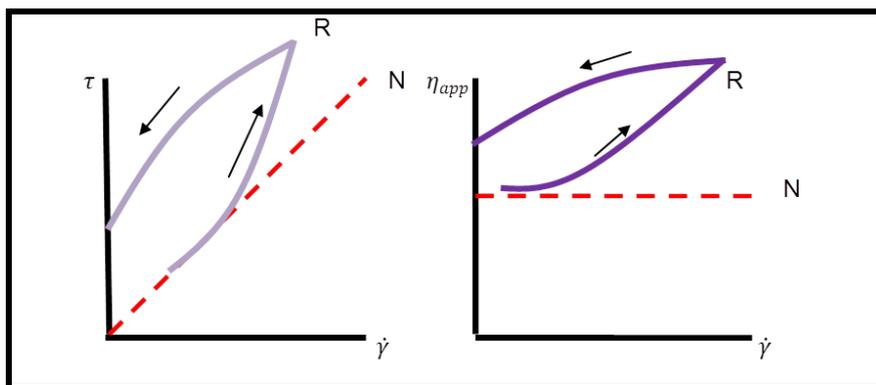


Figura 2.19. Gráficas de flujo reopéctico (Muller, 1978)

La reopexia es un espesamiento dependiente del tiempo, en que es curvilíneo. En el diagrama  $\tau - \dot{\gamma}$  estos dos parámetros no están unívocamente relacionados. Existen dos valores de  $\dot{\gamma}$  para cada valor de  $\tau$ , y a la inversa, si se hacen rutinariamente pruebas cíclicas. La reopexia es el fenómeno inverso

de la tixotropía, por lo que es igualmente necesario un riguroso control del tiempo en las determinaciones (Fig 2.19).

Existen pocos fluidos de este tipo. Algunos ejemplos son: la clara de huevo (Fig. 2.20), la arcilla bentonita, tinta de impresora, y el yeso.



**Figura 2.20.** La clara de huevo da lugar a un fluido reopéctico.

## **2.11. Reómetro electrónico RHEOLAB MC 120**

### **2.11.1 Aplicación**

Los reómetros del sistema RHEOLAB MC 120 se utilizan en investigación, desarrollo y control de calidad, también permiten la medición de la viscosidad de fluidos newtonianos, el registro de las curvas de flujo y la determinación de la viscosidad de fluidos no-newtonianos en flujo constante de cizalla. Además, permiten realizar estudios flujo unidireccional de cizalla variable y determinar los parámetros viscoelásticos de la sustancia durante procesos de oscilación, fluencia, tensión y relajación.

### **2.11.2 Principio de mediciones**

Como sistema de medición utilizan cilindros concéntricos, conos y placas. La muestra se coloca entre la placa y la geometría. El dispositivo de medida desarrollado para la serie de los equipos RHEOLAB trabaja con un sistema dinámico y un codificador óptico sin engranajes y sin transductor de fuerza mecánica, donde el torque se mide sin desviación.

Los sistemas RHEOLAB permiten determinar, tensión y relajación, pruebas rotatorias, entre otras, donde se establece la velocidad de cizallamiento y el par que actúa entre la muestra y la geometría para determinar la resistencia al flujo del esfuerzo de corte. Además, en una prueba de esfuerzo o deformación de cizallamiento es posible preestablecer el esfuerzo de corte deseado y medir la deformación por cizallamiento de la muestra a través de la desviación angular.

Los siguientes tipos de experimentos (métodos de medición) sólo se pueden hacer en el marco de un sistema informático y un software especial:

- Prueba de tensión
- Ensayo de relajación
- Ensayo de fluencia
- Prueba de oscilación

### **2.11.3 Modo de funcionamiento**

#### **2.11.3.1 Modo a distancia: para funcionamiento con el ordenador**

El modo de funcionamiento "REMOTO" se activa con el interruptor "RESULTADO", del propio aparato. Con esta función pueden realizarse las siguientes pruebas:

#### **2.11.3.2 Prueba de rotación**

- Medición individual
- Flujo y curva de viscosidad
- Viscosidad / hora
- Curva de flujo / temperatura
- Viscosidad / temperatura
- Viscosidad de cizallamiento constante

**2.11.3.3 Esfuerzo de corte** (tensión de corte controlada, la medición de la velocidad de cizalladura o deformación de corte)

- Medición individual
- Flujo y la curva de viscosidad
- Viscosidad / hora
- Curva de flujo / temperatura
- Viscosidad / temperatura
- Ensayo de fluencia

#### **2.11.3.4 Prueba o modo oscilatorio**

- Medición individual
- Amplitud de barrido
- Frecuencia de barrido
- Función temperatura
- Función tiempo
- Función frecuencia-tiempo

Al llevar a cabo las pruebas esfuerzo de cizalla con el software RHEO-LOGIC RS 120 la pantalla indica REM MODO 3 (REM MODO 2 para ensayo de fluencia), y la temperatura real.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materiales

- Espátula
- Mayonesa (McCormick)
- Mayonesa (La Costeña)
- yogur (Lala)
- yogur (Alpura)
- Cátsup (Del monte)
- Cátsup (La Costeña)
- Cátsup (Clemente Jacques)
- Agua desionizada

#### 3.1.1 Equipo

- Reómetro RHEOLAB MC-120 PAAR PHYSICA, (Fig. 28).
- Geometría de placas paralelas mp30
- Baño recirculador para reómetro (polyScience, intervalo de temperatura de 0°C,-90°C).

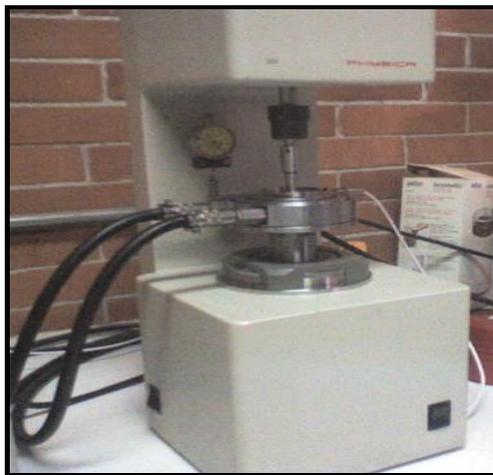


Figura 3.1. Reómetro Rheolab MC -120

## **3.2 MÉTODO**

### **3.2.1 Preparación del reómetro**

- Conectar el equipo, (reómetro, computador y baño)
- Ajustar temperatura de trabajo del reómetro y baño, (10, 25 y 35 °C)
- Colocar la geometría al equipo, sin apretar completamente
- Ajustar el equipo (el disco debe estar en cero)
- Fijar y calibrar a cero y la geometría
- Establecer el gape a 50  $\mu\text{m}$  (distancia entre la geometría y la placa)
- Bajar la placa con los botones negros y mover el disco (a la derecha 5 divisiones)
- Subir la placa con los botones negros y calibrar la distancia entre la placa y la geometría.
- Ingresar en el programa de la computadora los datos de trabajo
- Activar el baño y fijar la temperatura de trabajo
- Quitar la geometría
- Colocar la muestra en el equipo y bajar la geometría con los botones. Quitar el exceso de muestra con papel absorbente. Distribuir completamente la muestra girando un poco la geometría
- Ajustar la velocidad de cizalla
- Bajar la geometría, quitarla resbalándola hasta que salga del anillo teniendo cuidado de no golpear con el anillo, jalándola hacia el frente
- Limpiar las dos partes quitando la muestra con papel.
- Quitar la geometría (llave MK24/70), limpiarla y guardarla en su estuche
- Salvar los datos obtenidos al correr la muestra
- Apagar el equipo (computadora, reómetro, baño)

### **3.2.2 Preparación de las muestras**

- Las muestras se trabajan directamente de los recipientes comerciales, (se pueden colocar con una espátula)

### **3.2.3 Caracterización reológica de las muestras**

- Se utiliza un reómetro rotacional (Paar-Physica RHEOLAB MC-120), con baño recirculador con etilen glicol, para controlar la temperatura de trabajo (10, 25 y 35°C)
- Software Physica US 200, para el cálculo de los parámetros reológicos

- Geometría cono y plato Mk 24/70
- Tomar una muestra de cada uno de los productos comerciales y colocarla en el plato de manera que no sobrepase al cono, pero cubriendo completamente su parte interior
- El tiempo aproximado de cada medición es de 45 minutos
- Realizar por triplicado la determinación de los parámetros reológicos de las muestras

### 3.2.4 Condiciones de trabajo

- Se trabaja con una velocidad de cizalla de 0.5-400 s<sup>-1</sup>/log<sup>8</sup>
- Las corridas realizadas se analizan con el mismo programa<sup>9</sup>.

Las mediciones se realizaron en tiempos variados dependiendo de la fecha de caducidad del producto de la siguiente forma:

#### ◆ Salsa cátsup

Tiempo: Cinco meses (dos mediciones cada semana), eligiendo las siguientes para el análisis de los reogramas.

- La Costeña: 1, 6, 10, 15, 18, 20. (10 y 25°C)
- Del Monte 1, 6, 9, 12, 16, 19, 22. (10 Y 25°C)
- Del Monte: 1, 6, 10, 14, 17,21. (35°C)
- Clemente Jacques 1, 5, 9, 15, 20, 21. (35°C)

#### ◆ Mayonesa

Tiempo: tres meses (un ensayo cada semana), eligiendo las siguientes para el análisis de los reogramas:

- McCormick: 1, 6, 10, 12. (10, 25 y 35°C)
- La Costeña: 1, 4, 8, 12. (10, 25 y 35°C)

#### ◆ Yogur

Tiempo: dos meses con dos semanas (tres mediciones cada semana), eligiendo estas semanas para el análisis de los reogramas:

- Alpura: 1, 3, 6, 10. (10, 25 y 35°C)
- Lala: 1, 5, 8, 10. (10, 25 y 35°C)

---

<sup>8</sup> A menor velocidad, no se alcanza a leer la muestra, debido a que existe ruido en las mediciones. A mayor velocidad de cizalla, la muestra se sale de la placa, por lo tanto no se está midiendo adecuadamente las propiedades reológicas de la muestra. Sólo se mide aire.

<sup>9</sup> Las mediciones se establecieron con base en las fechas de caducidad de los productos.

## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los gráficos experimentales y los parámetros físicos, y los del diseño estadístico experimental anova de un solo factor de los productos alimenticios.

### 4.1. Productos trabajados.

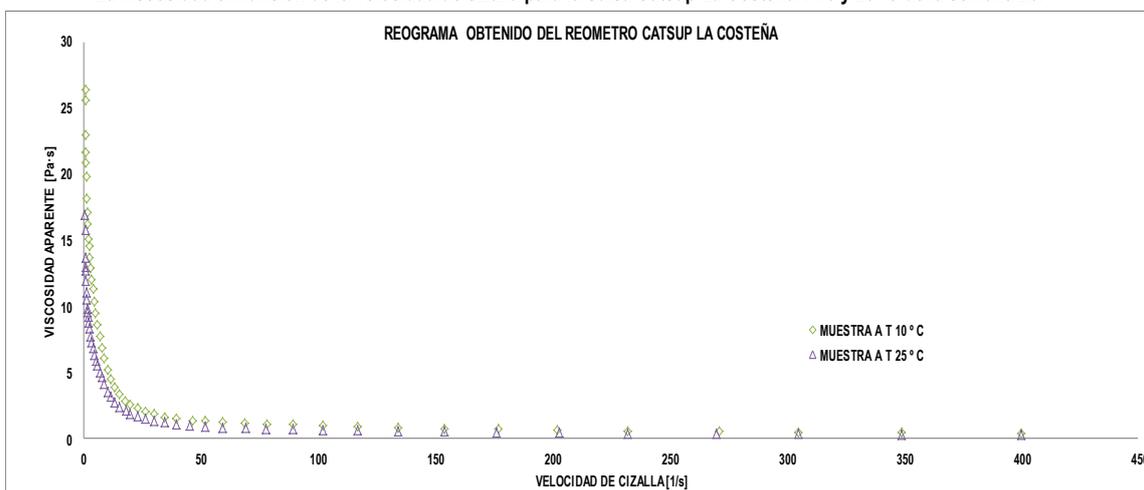
CUADRO 4.5. PRODUCTOS TRABAJADOS EN EL LABORATORIO

MARCA DE LOS PRODUCTO	TEMPERATURA °C	CADUCIDAD
Catsup La Costeña	10,25	Noviembre 2010
Catsup Del monte	10, 25	Enero 2010
Catsup Clemente Jacques	35	Mayo 2010
Catsup Del monte	35	Febrero 2010
Mayonesa La costeña	10, 25 y 35	Enero 2009
Mayonesa Mc Cormick	10, 25 y 35	Febrero 2009
Yogur Alpura Natural	10, 25 y 35	Diciembre 2008
Yogur Lala Natural	10, 25 y 35	Diciembre 2008

### 4.2. Gráficas del comportamiento reológico de la salsa catsup.

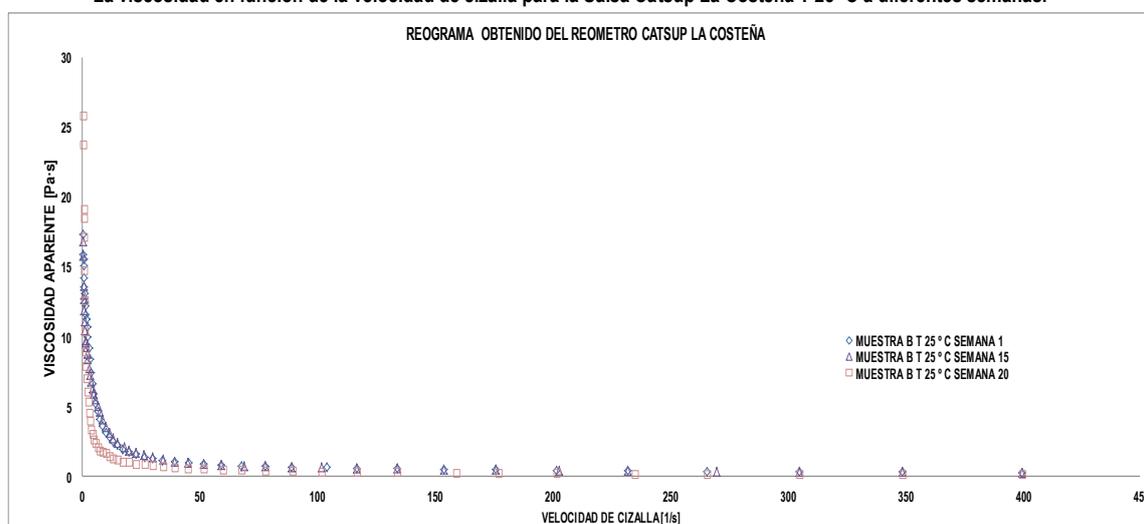
GRÁFICAS 4.1. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátup La Costeña T 10 y 25 °C de la semana 20.



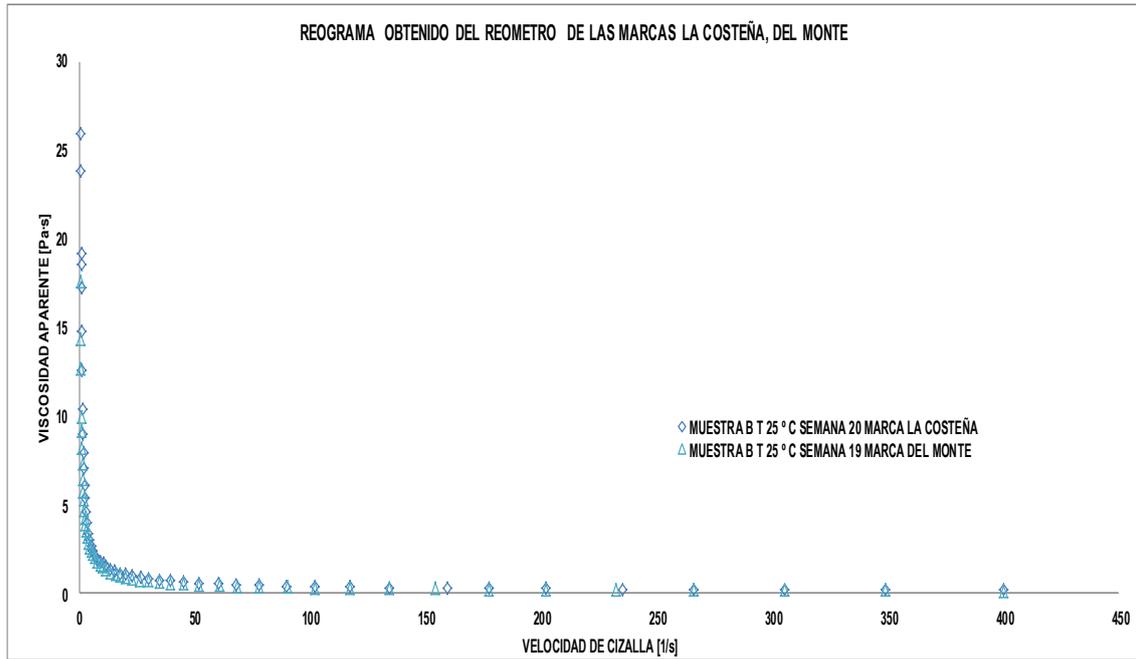
GRÁFICAS 4.2. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátup La Costeña T 25 °C a diferentes semanas.



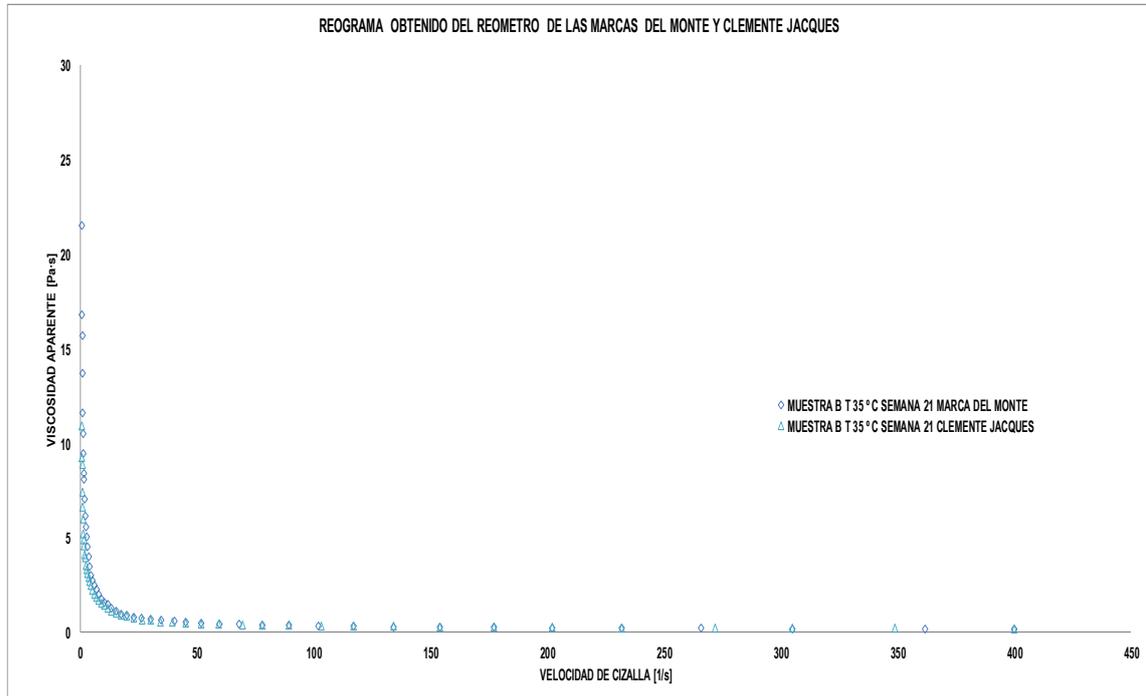
#### GRÁFICAS 4.3. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátup La Costeña y Del Monte T 25 °C.



#### GRÁFICAS 4.4. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Salsa Cátup Del Monte y Clemente Jacques T 25 °C.



### 4.3. Parámetros físicos de catsup.

k: índice de consistencia	R: coeficiente de correlación	R <sup>2</sup> = 0.954
n: índice de comportamiento al flujo	R <sup>2</sup> : coeficiente de determinación	y = 10.353 X <sup>0.3563</sup>

Cuadro 4.6. Parámetros físicos de las diferentes marcas de salsa catsup.				
<b>CAPSUP LA COSTEÑA T 10 °C SEMANA 15</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	10.353	0.3563	0.954	0,977
MUESTRA B	16.553	0.3767	0.976	0,988
MUESTRA C	16.062	0.3814	0.9761	0,988
PROMEDIO	16.99	0.371	0.9762	0,988
<b>CAPSUP LA COSTEÑA T 25 °C SEMANA 15</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	13.104	0.3553	0.955	0,977
MUESTRA B	15.118	0.3495	0.953	0,976
MUESTRA C	15.903	0.3402	0.935	0,967
PROMEDIO	14.71	0.348	0.944	0,972
<b>CAPSUP LA COSTEÑA T 25 °C SEMANA 1</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	10.597	0.3926	0.985	0,992
MUESTRA B	11.489	0.3772	0.977	0,989
MUESTRA C	11.71	0.3797	0.976	0,988
PROMEDIO	11.27	0.383	0.976	0,988
<b>CAPSUP LA COSTEÑA T 25 °C SEMANA 20</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	21.771	0.3092	0.937	0,968
MUESTRA B	6.7824	0.3741	0.997	0,999
MUESTRA C	5.0939	0.37	0.997	0,999
PROMEDIO	5.94	0.372	0.997	0,998
<b>CAPSUP DEL MONTE T 25 °C SEMANA 19</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	5.1832	0.3648	0.995	0,997
MUESTRA B	6.0752	0.3597	0.996	0,998
MUESTRA C	5.0941	0.3675	0.994	0,997
PROMEDIO	5.45	0.364	0.995	0,997
<b>CAPSUP DEL MONTE T 35 °C SEMANA 21</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	9.2285	0.2515	0.839	0,916
MUESTRA B	5.7477	0.3806	0.983	0,991
MUESTRA C	6.0236	0.3598	0.969	0,984
PROMEDIO	7.00	0.331	0.930	0,964
<b>CAPSUP CLEMENTE JACQUES T 35 °C SEMANA 21</b>				
	k	n	R <sup>2</sup>	R
MUESTRA A	4.2848	0.4619	0.983	0,991
MUESTRA B	4.0873	0.4556	0.978	0,989
MUESTRA C	4.0873	0.4556	0.978	0,989
PROMEDIO	4.15	0.458	0.9798	0,990

### 4.4. Diseño estadístico experimental anova de un solo factor: Salsa Catsup

Cuadro 4.7. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C de la salsa catsup marca La Costeña.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°c	12.06 A	0.41 A	0,650	0,0062	5,40	1,50
2	6	10°c	14.68 A	0.39 A	0,17	0,0049	1,2	1,3
3	10	10°c	13.29 A	0.401 A	0,49	0,0082	3,7	2
4	15	10°c	16.99 A	0.37 A	1,21	0,0133	7,1	3,6
5	18	10°c	15.44 A	0.34 A	0,440	0,0172	2,9	5,1
6	20	10°c	15.56 A	0.32 A	0,94	0,0001	6,0	0,0044

\* Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro 4.8. Parámetros físicos a diferentes semanas a T25°C de la salsa catsup marca La Costeña.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	11.27 B C	0.38 A	0,59	0,0083	5,20	2,2
2	6	25°C	13.08 A B C	0.36 A	1,36	0,0187	10,4	5,2
3	10	25°C	10.73 C	0.396 A	2,35	0,023	21,9	5,8
4	15	25°C	14.71 A	0.35 A	1,44	0,0076	9,8	2,2
5	18	25°C	15.28 A B	0.32 A	0,48	0,0105	3,1	3,3
6	20	25°C	5.94 D	0.372 A	1,19	0,0029	20,1	0,8

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro 4.9. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C de la salsa cátsup marca Del Monte.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°C	6.358 A	0.36 B	0,356	0,0023	5,60	0,63
2	6	10°C	8.67 A	0.36 B	0,63	0,0123	7,3	3,4
3	9	10°C	7.42 A B	0.37 A B	2,16	0,0118	29,1	3,2
4	12	10°C	7.47 A B	0.37 A B	0,88	0,0062	11,8	1,7
5	16	10°C	8.610 A	0.37 B	0,513	0,0047	6,0	1,3
6	19	10°C	5.76 A B	0.38 A B	0,37	0,0020	6,4	0,5
7	22	10°C	5.48 B	0.40 A	1,26	0,0052	22,9	1,3

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro 4.10. Parámetros físicos a diferentes semanas a T25°C de la salsa cátsup marca Del Monte.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	7.66 A	0.33 C	0,77	0,0055	10,01	1,7
2	6	25°C	7.5 A	0.35 B	0,24	0,0031	3,1	0,9
3	9	25°C	6.4 A B	0.35 B	1,42	0,0058	22,1	1,6
4	12	25°C	6.39 A B	0.36 B	0,42	0,0009	6,6	0,2
5	16	25°C	7.05 A	0.35 B	0,74	0,0107	10,4	3,0
6	19	25°C	5.45 A B	0.36 B	0,54	0,0040	10,0	1,1
7	22	25°C	4.34 B	0.40 A	1,16	0,0023	26,8	0,6

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro.4.11. Parámetros físicos a diferentes semanas a T35°C de la salsa cátsup marca Del Monte.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	6.23 A	0.36 A	0,160	0,0040	2,60	1,10
2	6	35°C	6.1 A	0.37 A	1,03	0,0156	16,9	4,2
3	10	35°C	7.25 A	0.34 A	0,73	0,0084	10	2,5
4	14	35°C	6.87 A	0.34 A	1,42	0,0226	20,8	6,6
5	17	35°C	5.68 A	0.37 A	0,280	0,0100	4,9	2,7
6	21	35°C	7.00 A	0.33 A	1,93	0,0693	27,6	21,0

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

Cuadro.4.12. Parámetros físicos a diferentes semanas a T35°C de la salsa cátsup marca Clemente Jacques.

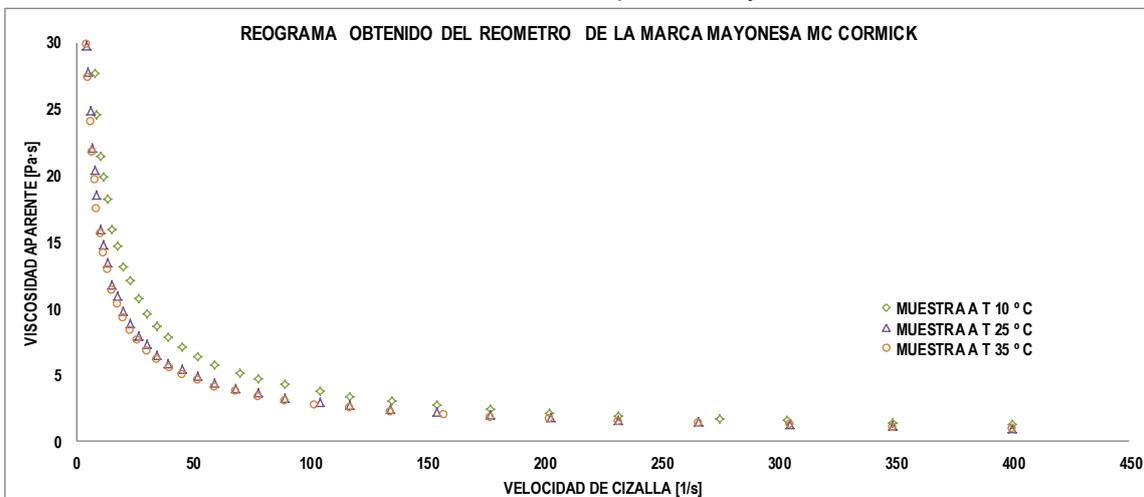
MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			$k$ (Pa·s <sup>n</sup> )	n	$k$ (Pa·s <sup>n</sup> )	n	$k$ (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	5.25 A	0.47 A	0,280	0,0023	5,30	0,50
2	5	35°C	5.12 A	0.47 A	0,38	0,0061	7,5	1,3
3	9	35°C	5.59 A	0.47 A	0,06	0,0025	1,1	0,5
4	15	35°C	4.99 A	0.47 A	0,3	0,0005	6	0,1
5	20	35°C	5.27 A	0.45 B	0,200	0,0081	3,7	1,8
6	21	35°C	4.15 B	0.46 AB	0,11	0,0036	2,7	0,8

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

#### 4.5. Gráficas del comportamiento reológico de la mayonesa.

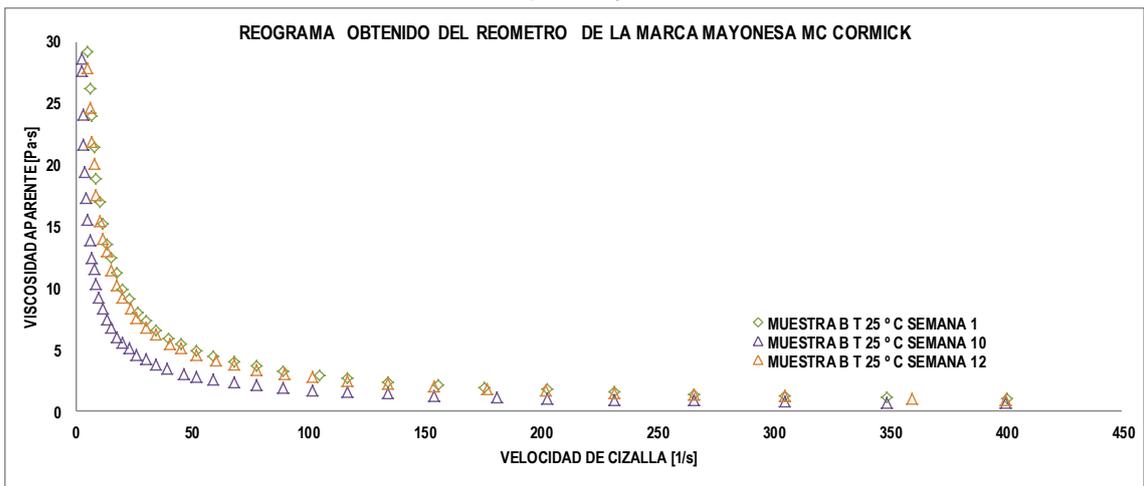
GRÁFICAS 4.5. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la T 10, 25 y 35°C de la semana 13.



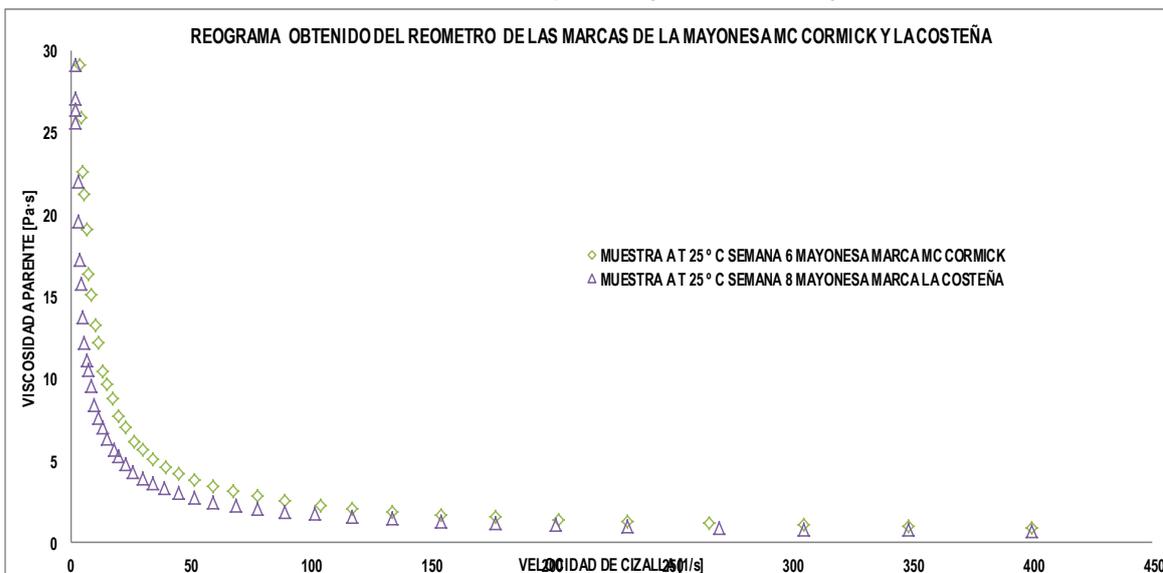
GRÁFICAS 4.6. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la Mayonesa Mc Cormick T 25 °C a diferentes semanas.



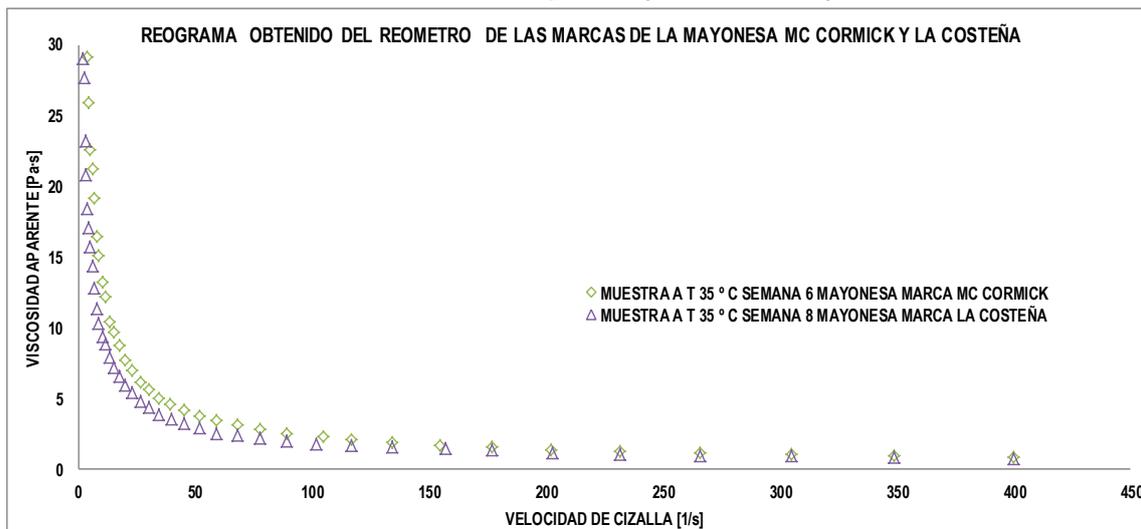
#### GRÁFICAS 4.7. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las mayonesas Mc Cormick y La Costeña T 25 °C.



#### GRÁFICAS 4.8. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para las mayonesas Mc Cormick y La Costeña T 35 °C.



#### 4.6. Parámetros físicos de mayonesa.

k: índice de consistencia

R: coeficiente de correlación

R<sup>2</sup>= 0.9995

n: índice de comportamiento al flujo

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación

$y = 90.121 X^{0.744}$

Cuadro 4.13. Parámetros físicos de las diferentes marcas de mayonesa				
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 25 °C SEMANA 1</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	90.121	0.744	0.9997	0.9995
MUESTRA B	97.593	0.759	0.9997	0.9994
MUESTRA C	90.873	0.742	0.9995	0.9991
PROMEDIO	92.86	0.748	0.9996	0.9993
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 25 °C SEMANA 6</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	68.939	0.737	0.9996	0.9993
MUESTRA B	65.323	0.719	0.9997	0.9995
MUESTRA C	85.962	0.750	0.9998	0.9996
PROMEDIO	73.410	0.735	0.9997	0.9995
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 10 °C SEMANA 10</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	64.473	0.712	0.9984	0.9968
MUESTRA B	71.822	0.737	0.9996	0.9993
MUESTRA C	84.475	0.741	0.9995	0.9991
PROMEDIO	75.590	0.730	0.9992	0.9984
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 25 °C SEMANA 10</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	32.753	0.678	0.9996	0.9993
MUESTRA B	49.874	0.714	0.9995	0.9991
MUESTRA C	44.834	0.702	0.9982	0.9965
PROMEDIO	42.490	0.698	0.9991	0.9983
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 35 °C SEMANA 10</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	56.953	0.757	0.9985	0.9970
MUESTRA B	40.149	0.729	0.9994	0.9988
MUESTRA C	72.393	0.747	0.9998	0.9996
PROMEDIO	56.50	0.744	0.9992	0.9985
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 25 °C SEMANA 12</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	90.876	0.74	0.9995	0.999
MUESTRA B	88.934	0.752	0.9996	0.9993
MUESTRA C	86.153	0.741	0.9996	0.9992
PROMEDIO	88.65	0.744	0.9996	0.9992
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 25 °C SEMANA 6</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	68.939	0.737	0.9996	0.9993
MUESTRA B	65.323	0.719	0.9997	0.9995
MUESTRA C	85.962	0.75	0.9998	0.9996
PROMEDIO	73.41	0.735	0.9997	0.9995
<b>MAYONESA Mc CORMICK T 35 °C SEMANA 6</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	69.274	0.734	0.9985	0.9971
MUESTRA B	83.374	0.753	0.9997	0.9994
MUESTRA C	88.285	0.745	0.9994	0.9989
PROMEDIO	80.310	0.744	0.9996	0.9992
<b>MAYONESA LA COSTEÑA T 25 °C SEMANA 8</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	42.101	0.695	0.9995	0.9991
MUESTRA B	41.366	0.698	0.9997	0.9995
MUESTRA C	32.753	0.678	0.9996	0.9993
PROMEDIO	38.740	0.690	0.9996	0.9993
<b>MAYONESA LA COSTEÑA T 35 °C SEMANA 8</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
MUESTRA A	46.889	0.700	0.9995	0.9990
MUESTRA B	54.555	0.731	0.9981	0.9963
MUESTRA C	55.154	0.736	0.9984	0.9967
PROMEDIO	52.200	0.722	0.9986	0.9973

## 4.7 Diseño estadístico experimental anova de un solo factor: Mayonesa.

Cuadro 4.14. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C de la mayonesa marca Mc Cormick.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°C	115.8 A	0.76 A	24,63	0,0222	21,30	2,90
2	6	10°C	92.9 A	0.73 A	13,44	0,0252	14,5	3,4
3	10	10°C	75.59 A	0.73 A	10,12	0,0157	13,7	2,2
4	12	10°C	95.42 A	0.75 A	22,73	0,0247	23,8	3,3

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

Cuadro 4.15. Parámetros físicos a diferentes semanas a T 25°C de la mayonesa marca Mc Cormick.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	92.86 A	0.75 A	4,11	0,0093	4,40	1,2
2	6	25°C	73.41 A	0.74 A	11,02	0,0156	15	2,1
3	10	25°C	42.49 B	0.698 A	8,8	0,0183	20,7	2,6
4	12	25°C	88.65 A	0.74 A	2,37	0,0067	2,7	0,9

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA

Cuadro 4.16. Parámetros físicos a diferentes semanas a T 35°C de la mayonesa marca Mc Cormick.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	73.73 A	0.74 A	15,55	0,0035	21,10	0,5
2	6	35°C	80.31 A	0.74 A	9,87	0,0095	12,3	1,3
3	10	35°C	56.5 A	0.74 A	16,13	0,0142	28,5	1,9
4	12	35°C	75.52 A	0.74 A	6,05	0,0104	7,9	1,4

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA

Cuadro 4.17. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C de la mayonesa marca La Costeña.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°C	81.37 AB	0.73 A	17,050	0,0375	20,90	5,10
2	4	10°C	71.5 AB	0.71 A	9,2	0,0093	12,9	1,3
3	8	10°C	59.28 B	0.71 A	18,77	0,0227	31,7	3,2
4	12	10°C	102.16 A	0.71 A	15,9	0,0212	15,6	3

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

Cuadro 4.18. Parámetros físicos a diferentes semanas a T25°C de la mayonesa marca La Costeña.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	61.6 AB	0.700A	9,53	0,0205	15,50	2,9
2	4	25°C	57.14 B	0.703A	0,6	0,0032	1,1	0,5
3	8	25°C	38.74 B	0.690A	5,2	0,0108	13,4	1,6
4	12	25°C	83.48 A	0.709A	4,52	0,0111	5,4	1,6

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

Cuadro 4.19. Parámetros físicos a diferentes semanas a T35°C de la mayonesa marca La Costeña.

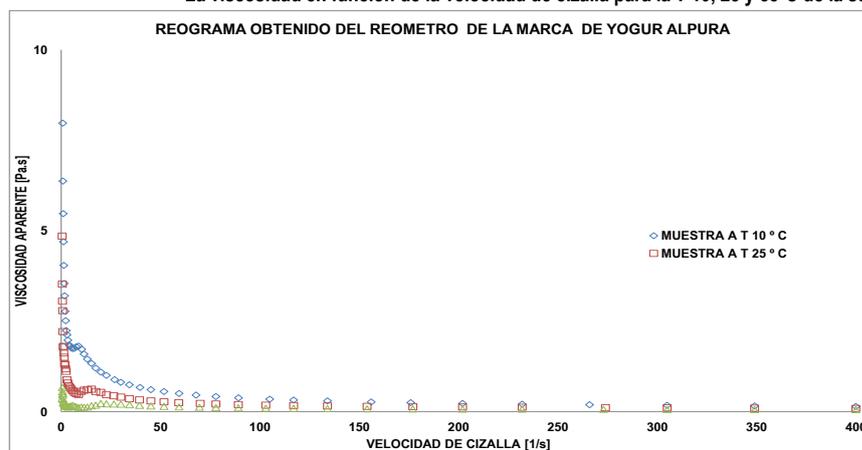
MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	52.86 B	0.703 B	1,80	0,0051	3,40	0,7
2	4	35°C	55.1 B	0.716 AB	1,34	0,0085	2,4	1,2
3	8	35°C	52.2 B	0.722 AB	4,61	0,0195	8,8	2,7
4	12	35°C	72.9 A	0.743 A	4,5	0,0015	6,2	0,2

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

## 4.8. Gráficas del comportamiento reológico de yogur

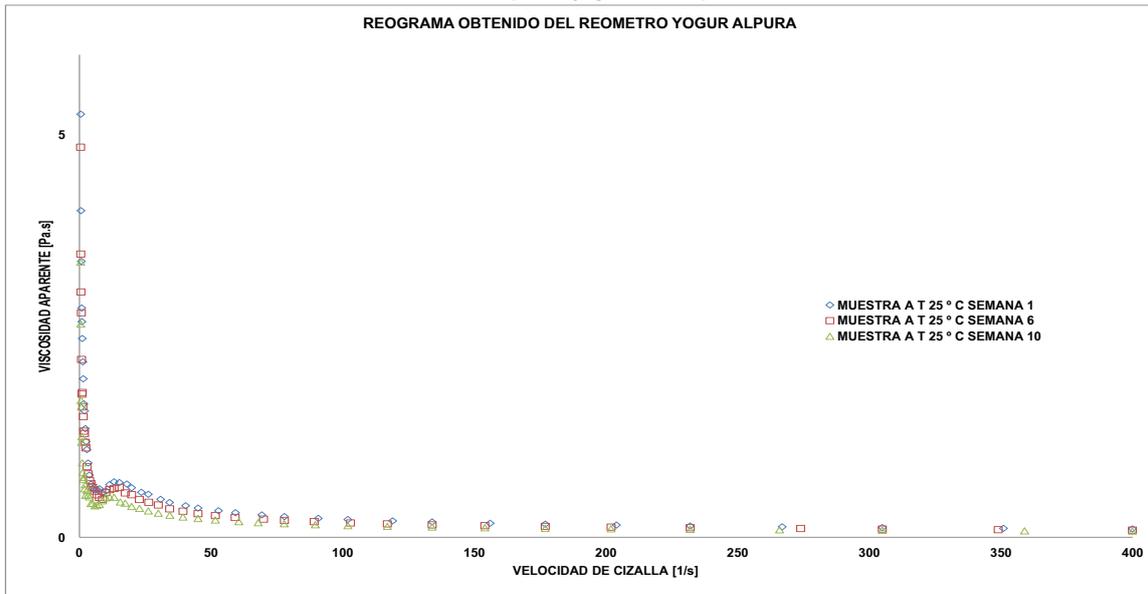
GRÁFICAS 4.9. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para la T 10, 25 y 35°C de la semana 10.



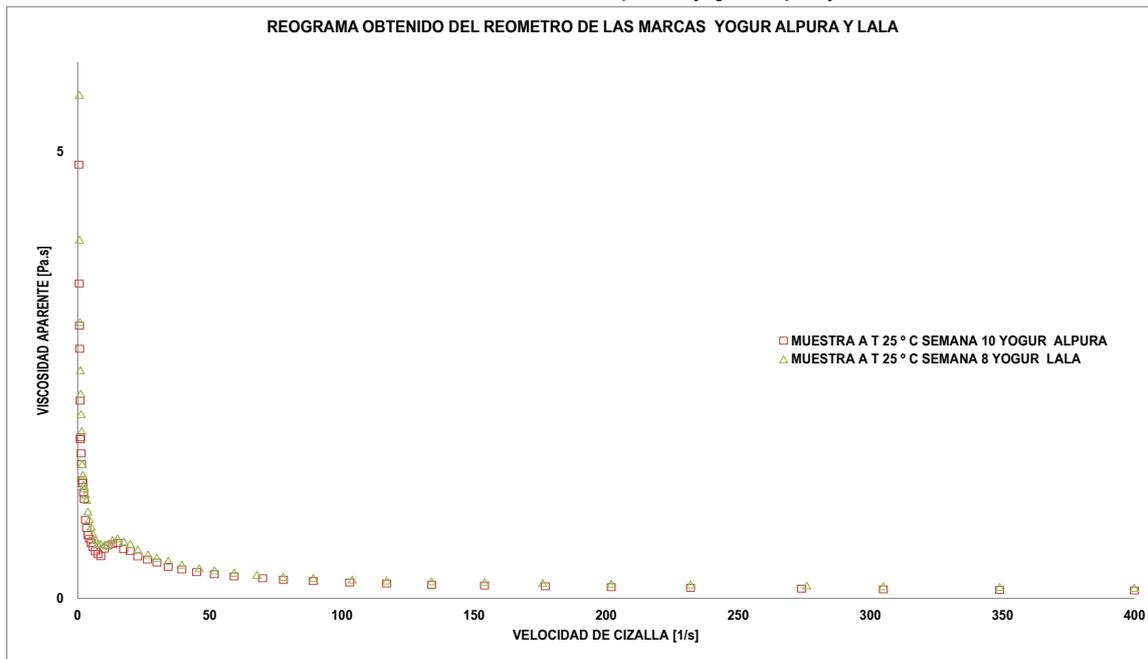
GRÁFICAS 4.10. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para el yogur marca Alpura natural T 25 °C a diferentes semanas.



GRÁFICAS 4.11. (SALIDA DEL REÓMETRO)

La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los yogures Alpura y Lala T 25 °C.



GRÁFICAS 4.12. (SALIDA DEL REÓMETRO)  
La viscosidad en función de la velocidad de cizalla para los yogures Alpura y Lala T 35 °C.



#### 4.9. Parámetros físicos de yogur

k: índice de consistencia

R: coeficiente de correlación

R<sup>2</sup>= 0.9978

n: índice de comportamiento al flujo

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación

$$y = 9.4741 X^{0.284}$$

Cuadro 4.20. Parámetros físicos de las diferentes marcas de yogur

YOGHURT ALPURA T 25 °C SEMANA 1	k	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	9.4741	0.284	0,9989	0.9978
MUESTRA B	8.8902	0.3072	0,9989	0.9978
MUESTRA C	9.5549	0.2981	0,9992	0.9985
PROMEDIO	9.310	0.296	0,9990	0.9980
YOGHURT ALPURA T 10 °C SEMANA 6				
MUESTRA A	7.7949	0.3300	0,9992	0.9985
MUESTRA B	7.5249	0.3325	0,9989	0.9978
MUESTRA C	9.8138	0.2988	0,9994	0.9989
PROMEDIO	8.378	0.320	0,9992	0.9984
YOGHURT ALPURA T 25 °C SEMANA 6	K	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	2.6574	0.4241	0,9957	0.9914
MUESTRA B	2.0007	0.4476	0,9969	0.9939
MUESTRA C	2.1621	0.4419	0,9961	0.9923
PROMEDIO	2.27	0.438	0,9965	0.993
YOGHURT ALPURA T 35 °C SEMANA 6	k	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	1.1505	0.4701	0,9933	0.9867
MUESTRA B	1.1244	0.4853	0,9943	0.9887
MUESTRA C	1.1505	0.4701	0,9933	0.9867
PROMEDIO	1.14	0.475	0,9935	0.987
YOGHURT ALPURA T 25 °C SEMANA 10	k	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	1.7442	0.4694	0,9975	0.9951
MUESTRA B	1.6718	0.4608	0,9966	0.9933
MUESTRA C	2.0233	0.4466	0,9954	0.9908
PROMEDIO	1.81	0.459	0,9965	0.993
YOGHURT LALA T 25°C SEMANA 8	k	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	2.3737	0.4918	0,9924	0.9848
MUESTRA B	2.8193	0.4714	0,9886	0.9773
MUESTRA C	2.5785	0.4895	0,9899	0.98
PROMEDIO	2.59	0.484	0,9905	0.981
YOGHURT LALA T 35 °C SEMANA 8	k	n	R	R <sup>2</sup>
MUESTRA A	1.3126	0.5279	0,9839	0.9681
MUESTRA B	1.3657	0.5165	0,9845	0.9693
MUESTRA C	1.2022	0.5297	0,9837	0.9676
PROMEDIO	1.29	0.525	0,9839	0.968

#### 4.10. Diseño estadístico experimental anova de un solo factor: yogur.

Cuadro 4.21. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C del yogur marca Alpura

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°C	9.31 A	0.30 A	0,360	0,01	3,90	3,90
2	3	10°C	9.63 A	0.31 A	3,98	0,05	41,3	16,7
3	6	10°C	8.38 A	0.32 A	1,25	0,02	14,9	5,9
4	10	10°C	6.22 A	0.35 A	0,67	0,01	10,7	2,6

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

Cuadro 4.22. Parámetros físicos a diferentes semanas a T25°C del yogur marca Alpura

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	3.55 A	0.41 C	0,06	0,0021	1,80	0,5
2	3	25°C	2.69 B	0.43 B	0,2	0,0079	7,5	1,8
3	6	25°C	2.27 BC	0.44 AB	0,34	0,0123	15,1	2,8
4	10	25°C	1.81 C	0.46 A	0,19	0,0115	10,2	2,5

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA

Cuadro 4.23. Parámetros físicos a diferentes semanas a T35°C del yogur marca Alpura.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	2.33 A	0.43 B	0,54	0,0220	23,00	5,1
2	3	35°C	1.17 B	0.49 A	0,04	0,0008	3,1	0,2
3	6	35°C	1.14 B	0.48 A	0,02	0,0088	1,3	1,8
4	10	35°C	1.07 B	0.46 AB	0,28	0,0160	26,6	3,4

Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA

Cuadro 4.24. Parámetros físicos a diferentes semanas a T10°C del yogur marca Lala.

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	10°C	11.06 A	0.36 B	0.330	0.0105	7.90	2.90
2	5	10°C	6.52 B	0.42 A	1.48	0.0247	22.88	5.9
3	11	10°C	6.82 B	0.41 A	0.4	0.0019	5.9	0.5
4	13	10°C	5.62 B	0.47 A	2.29	0.1024	40.7	21.7

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro 4.25. Parámetros físicos a diferentes semanas a T25°C del yogur marca Lala.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	25°C	3.79 A	0.47 B	0,21	0,0056	5,60	1,2
2	5	25°C	2.63 B	0.48 A	0,37	0,0026	14	0,5
3	8	25°C	2.59 B	0.48 A	0,22	0,0112	8,6	2,3
4	13	25°C	2.4 B	0.49 A	0,21	0,0055	8,8	1,1

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

**Cuadro 4 26. Parámetros físicos a diferentes semanas a T35°C del yogur marca Lala.**

MUESTRA	SEMANA	TEMPERATURA	PROMEDIO		DESVIACION ESTANDAR		COEFICIENTE DE VARIACION %	
			k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n	k (Pa·s <sup>n</sup> )	n
1	1	35°C	1.94 A	0.50 A	0,09	0,0057	4,40	1,2
2	5	35°C	1.85 A	0.51 A	0,43	0,0206	23,3	4
3	8	35°C	1.29 AB	0.53 A	0,08	0,0072	6,4	1,4
4	10	35°C	1.13 B	0.52 A	0,25	0,00057	22	0,2

\*Letras diferentes indica que existe diferencia significativa entre medias (P<0.05) por ANOVA.

## 5. DISCUSIÓN

A continuación se analizan los resultados de los datos experimentales de los productos alimenticios trabajados.

### 5.1 Reogramas

1, 2 y 3 corresponden a las salsas cátsup:

La Costeña y Del Monte: 10 y 25 °C; y el

4 a Del Monte y Clemente Jacques a 35 °C;

5, 6, 7, 8, corresponden a la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla, para las mayonesas

La Costeña y Mc Cormick, a 10, 25 y 35°C,

9, 10, 11 y 12 presentan el comportamiento del yogur

Alpura y Lala naturales a 10, 25 y 35°C.

### 5.2 Determinación de parámetros

Los productos comerciales se aplican directamente en la geometría del reómetro para determinar sus parámetros:

- viscosidad aparente ( $\eta$ )
- índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ )
- índice de comportamiento al flujo ( $n$ )

Las temperaturas de trabajo de cada muestra, se eligieron con base en los diferentes grupos y subgrupos de climas de México, (cálidos, secos y templados). para simular el comportamiento de las muestras en diferentes regiones del país.

Las muestras se trabajaron a diferentes intervalos de semanas, dependiendo de la fecha de caducidad del producto comercial (4.1. Productos trabajados).

Las mediciones se realizaron en tiempos variados dependiendo de la fecha de caducidad del producto de la siguiente forma:

#### ◆ Salsa cátsup

Tiempo: Cinco meses (dos mediciones cada semana), eligiendo las siguientes para el análisis de los reogramas.

- La Costeña: 1, 6, 10, 15, 18, 20. (10 y 25°C)
- Del Monte 1, 6, 9, 12, 16, 19, 22. (10 Y 25°C)
- Del Monte: 1, 6, 10, 14, 17, 21. (35°C)
- Clemente Jacques 1, 5, 9, 15, 20, 21. (35°C)

- ◆ Mayonesa  
Tiempo: tres meses (un ensayo cada semana), eligiendo las siguientes para el análisis de los reogramas:
  - McCormick: 1, 6, 10, 12. (10, 25 y 35°C)
  - La Costeña: 1, 4, 8, 12. (10, 25 y 35°C)
  -
  
- ◆ Yogur  
Tiempo: dos meses (tres mediciones cada semana), eligiendo estas semanas para el análisis de los reogramas:
  - Alpura: 1, 3, 6, 10. (10, 25 y 35°C)
  - Lala: 1, 5, 8, 10. (10, 25 y 35°C)

Sólo se presentan las curvas representativas.

El comportamiento de los productos con base en el análisis de los reogramas se describe a continuación, por producto.

### 5.3 Salsa Cátsup

La Gráfica 4.1 presenta, para La Costeña, el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla a 10 y 25°C, (semana 20). La viscosidad aparente disminuye al aumentar la temperatura.

Se compara el efecto de la viscosidad aparente (Gráfica 4.2) en función de velocidad de corte (semanas 1, 15, 20). Las curvas de viscosidad aparente a 25 °C (semana 1, 15), se superponen lo que indica que no es significativo el cambio de viscosidad. En la semana 20 la viscosidad disminuye.

Los coeficientes de correlación y determinación (Cuadro 4.6) validan el comportamiento reológico indicado, con base en la Ley de Potencia (pág 27).

Las muestras analizadas, presentan un comportamiento adelgazante debido a que los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) son menores de (1). Además se observa que el modelo de Ostwald-De Waale presenta valores de 0.916 a 0.999 de coeficiente de correlación (R), lo que confirma el comportamiento reológico de tipo pseudoplástico de los productos comerciales.

Las muestras presentaron un comportamiento no newtoniano fluidificante, donde la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la velocidad de corte, y su comportamiento corresponde al de un fluido pseudoplástico.

Los valores de  $\mathcal{K}$  y  $n$  describen el comportamiento del fluido. La consistencia  $\mathcal{K}$  es un indicador de la viscosidad del sistema, resultando que a mayor  $\mathcal{K}$  el material es más viscoso o consistente.

El índice de comportamiento al flujo  $n$  presenta valores de 0.41 y 0.38 respectivamente, todos se encuentran alejados de la unidad, pero son cercanos entre ellos, y característicos de materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $K$ , para 10°C fue de 12.06 Pa·s<sup>n</sup> y a 25°C a 11.27 Pa·s<sup>n</sup>, en el que se observa la disminución de la consistencia por efecto del aumento de temperatura.

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento, indican que  $K$  a 10°C, tuvo una variación de 12 a 17 Pa·s<sup>n</sup>. No se observó una variación sistemática. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que no hay diferencias significativas (P=0.622), (Cuadro 4.7).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 10 °C, varía entre 0.41 y 0.32. Anova indica que no hay diferencia significativa entre los valores (P=0.170), indicando que la consistencia de la muestra se mantuvo estable durante el almacenamiento. (Cuadro 4.7).

Analizando las caracterizaciones reológicas a 25°C (Cuadro 4.8), se observa que el índice de consistencia  $K$  no tiene una variación sistemática. Sin embargo, en la semana 20 presentó una  $K$  mucho menor 5.94 Pa·s<sup>n</sup>. Esta disminución puede atribuirse a un reacomodo de la estructura de la salsa cátsup La Costeña, durante el periodo de almacenamiento. El análisis estadístico indica que hay diferencias significativas de la  $K$  en la semana 20, con respecto a las demás. Por otra parte, el índice de consistencia de la semana 6, 15 y 18 son similares, así como los valores de las semanas 1, 6 y 18 y las de la semana 1, 6 y 10 (P= 0.001).(Cuadro 4.8).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 25°C varía entre 0.38 y 0.37. El análisis estadístico indica que no hay diferencia significativa entre los valores (P=0.160), lo que sugiere que la consistencia de la muestra se mantuvo estable durante el almacenamiento. (Cuadro 4.8)

La Gráfica 4.3, 4.4 presenta, para La Costeña y Del Monte a 25 °C, Clemente Jacques y Del Monte a 35 °C, el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla. La viscosidad aparente disminuye al aumentar la temperatura. La viscosidad de las dos marcas se mantiene constante.

Los valores de  $n$  de la salsa cátsup Del Monte a las temperaturas de estudio,(10, 25 y 35°C), presentaron una  $n$  de 0.36, 0.33 y 0.36 respectivamente; son valores alejados de la unidad, cercanos entre ellos, y característicos de los materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $K$ , a 10°C fue de 6.358 Pa·s<sup>n</sup>, a 25°C de 7.66 Pa·s<sup>n</sup> y a 35°C de 6.23 Pa·s<sup>n</sup> en el que se observa la disminución de la consistencia por efecto del aumento de temperatura sólo a las temperaturas de 10 y 35°C. (Cuadros 4.9, 4.10 y 4.11)

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, indica que  $\mathcal{K}$  a 10°C, aumentó de 6.358 a 8.67 Pa·s<sup>n</sup>. El aumento en el índice de consistencia, no es proporcional al tiempo de almacenamiento, este aumento pudiera atribuirse a una restructuración interna en la muestra. En la semana 19 y 22 presentó una  $\mathcal{K}$  de 5.76 Pa·s<sup>n</sup> y 5.48 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico indica que existieron diferencias significativas en la  $\mathcal{K}$ . Esta disminución pudiera atribuirse a un rompimiento de la estructura (P=0.003), o de algunas uniones de tipo electrostático, disgregación de partículas o puentes de hidrógeno en la estructura de la catsup.

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 10 °C presenta un aumento de 0.36 a 0.40, confirmando el carácter fluidificante de la misma. El análisis estadístico muestra que hay diferencia significativa entre los valores de  $n$ , (P= 0.006), (Cuadro 4.9).

El índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 25°C tiene un comportamiento similar al índice de consistencia de 10°C, sin embargo en la semana 19 y 22 presentó una  $\mathcal{K}$  de 5.45 Pa·s<sup>n</sup> y 4.34 Pa·s<sup>n</sup>, esta disminución pudiera atribuirse al rompimiento de estructura explicada anteriormente (Cuadro 6).

El índice de flujo  $n$  a 25°C, muestra, un aumento de 0.33 a 0.40. El análisis estadístico indica que sí existieron diferencias significativas en  $n$  (P=0.008) (Cuadro 4.10).

Para el índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 35°C, los valores se mantienen entre 5.68 a 7.25 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico indica que no hubo diferencias significativas con respecto al tiempo de almacenamiento (P=0.514).

El índice de flujo  $n$  a 35°C, no muestra cambio significativo, indicando que el fluido se mantuvo estable. (P=0.640) (Cuadro 4.11).

Al analizar los valores de  $n$  de la salsa catsup Clemente Jacques a 35°C, inicialmente presentó una  $n$  de 0.47, que son datos característicos de materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $\mathcal{K}$ , a 35°C fue 5.25 Pa·s<sup>n</sup> (Cuadro 4.12).

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, indican que  $\mathcal{K}$  a 35°C, aumentó de 5.25 a 5.6 Pa·s<sup>n</sup>, y en la semana 43 disminuyó a 4.15 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico indica que existe cambio significativo entre los valores (P=0.000), esta disminución pudiera atribuirse a un rompimiento de estructura de la catsup.

El índice de flujo  $n$ , presenta una disminución de 0.47 a 0.45, y (anova de un solo factor), indica que si hay una diferencia significativa entre los valores obtenidos de la semana 20 y 21, (P=0.000). Y sugiere que la catsup Clemente Jacques puede sufrir un reacomodo en la estructura (Cuadro 4.12).

## 5.4 Mayonesa

La Gráfica 5, presenta, para McCormick el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla a 10, 25 y 35°C, (semana 13). La viscosidad aparente, disminuye al aumentar la temperatura.

Se compara el efecto de la viscosidad aparente (Gráfica 4.6) en función de velocidad de cizalla (semanas 1, 10, 12). Las curvas de viscosidad aparente a 25 °C,( semana 1 y 12), se sobreponen, lo que indica que no es significativo el cambio de viscosidad. En la semana 10 la viscosidad disminuye.

Los coeficientes de correlación y determinación (Cuadro 4.13) validan el comportamiento reológico indicado, con base en la Ley de Potencia.

Las muestras analizadas, presentan un comportamiento adelgazante debido a que los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) son menores de uno. Además se observa que el modelo de Ostwald-De Waale presenta valores de 0.998 a 0.999 de coeficiente de correlación ( $R$ ), lo que confirma el comportamiento reológico de tipo pseudoplástico de los productos comerciales.

Las muestras presentaron un comportamiento no newtoniano fluidificante por la cizalla, donde la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la cizalla, y su comportamiento corresponde al de un fluido pseudoplástico.

El índice de flujo  $n$ , presenta valores de 0.76, 0.75 y 0.74 respectivamente, alejados de la unidad, estos valores son cercanos entre ellos, pero característicos de los materiales fluidificantes (Cuadros 4.14, 4.15 y 4.16). El índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 10°C fue de 115.8 Pa·s<sup>n</sup>, a 25°C de 92.86 Pa·s<sup>n</sup> y a 35°C 73.73 Pa·s<sup>n</sup> en el que se observa la disminución de la consistencia por efecto de temperatura.

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, indican que  $\mathcal{K}$  a 10°C, tuvo una variación de 115.8 a 75.59 Pa·s<sup>n</sup>, se observa una tendencia a disminuir y en la semana 15 aumenta. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que no hay diferencia significativa ( $P=0.129$ ), (Cuadro 4.14).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 10°C, fue de 0.76 y 0.73. El análisis estadístico indica que no existe diferencia significativa entre los valores ( $P=0.458$ ). (Cuadro 4.14)

Analizando los resultados de las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia,  $\mathcal{K}$  a 25°C fue de 92.86 a 42.49 Pa·s<sup>n</sup>. Indica una tendencia a disminuir y en la semana 10 aumenta. El análisis estadístico (anova de un solo

factor), indica que existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$ , presente en la semana 3 ( $P=0.000$ ). Esta disminución pudo atribuirse a un reacomodo de la estructura de la mayonesa marca McCormick, (Cuadro 4.15).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a  $25^{\circ}\text{C}$ , es de 0.75 a 0.698. El análisis estadístico indicó que no existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos de todas las semanas ( $P=0.087$ ), (Cuadro 4.15).

Las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia,  $\mathcal{K}$  a  $35^{\circ}\text{C}$  presentan una variación de 73.73 a 56.5  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ . Se observó una tendencia a disminuir y aumentar. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que no existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$  ( $P=0.170$ ) (Cuadro 4.16).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a  $35^{\circ}\text{C}$  se mantiene constante 0.74. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indicó que no existe una diferencia significativa entre los valores. Se mantuvo estable la muestra de mayonesa McCormick ( $P=0.704$ ). (Cuadro 4.16).

Las Gráficas 4.7y 4.8 presentan, para las marcas Mc Cormick y La Costeña a 25 y  $35^{\circ}\text{C}$ , el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla. La viscosidad aparente de la mayonesa La Costeña fue más baja, en comparación con la mayonesa Mc Cormick.

El índice de flujo  $n$  de la mayonesa La Costeña a las temperaturas  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  y  $35^{\circ}\text{C}$ , presenta valores de 0.730, 0.700 y 0.703 respectivamente, alejados de la unidad, estos valores son cercanos entre ellos, pero característicos de los materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a  $10^{\circ}\text{C}$  fue de 81.37  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ , a  $25^{\circ}\text{C}$  fue de 61.6  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  y a  $35^{\circ}\text{C}$  de 52.86  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  en el que se confirma la disminución de la consistencia por efecto de temperatura. (Cuadros 4.17, 4.18 y 4.19).

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, indican, que  $\mathcal{K}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , tuvo una variación de 81.37 a 59.28  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ . Se observa una tendencia a disminuir, en la semana 12 se muestra un aumento de  $\mathcal{K}$  a 102.16  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ . El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que sí hay una diferencia significativa en la semana 1 y 4, pero también presentó una  $\mathcal{K}$  similar en las semanas 1, 4 y 12 al igual que en las semanas 1, 4 y 8 ( $P=0.001$ ), (Cuadro 4.17). Esto se puede atribuir a un reacomodo de la estructura de la mayonesa marca La Costeña.

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , varía 0.73 y 0.71. El análisis estadístico indica que no existe diferencia significativa entre los valores obtenidos. Esto puede atribuirse que la muestra se mantuvo estable. ( $P=0.671$ ) (Cuadro 4.17).

Analizando los resultados de las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia, ( $\mathcal{K}$ ) a 25°C, fue de 61.6 a 38.74 Pa·s<sup>n</sup>. Muestra una tendencia a disminuir. En la semana 12 aumento a 83.48 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que si existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$  (P=0.004). Este comportamiento puede atribuirse a un reacomodo de la estructura de la mayonesa marca La Costeña (Cuadro 4.18).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 25°C, varía 0.700 a 0.709. El análisis estadístico indica que no existe una diferencia significativa entre los valores de todas las semanas (P=0.495) (Cuadro 4.18).

Analizando los resultados de las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia, ( $\mathcal{K}$ ) a 35°C, presenta un comportamiento de disminución en la semanas 1 y 8 de 52.86 a 52.2 Pa·sn, también se observó una tendencia aumentar en la semanas 4 y 12. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que sí existe diferencia significativa en la semana 12, también indica que en las semanas 1, 4 y 8 los índice de consistencia son similares (P=0.000) (Cuadro 4.19).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 35°C, va de 0.703 a 0.743. El análisis estadístico indica que sí existe una diferencia significativa entre los valores de las semanas 1 y 12. También se comprobó que en la semanas 4, 8 y 12 son similares, al igual que las semanas 1, 4 y 8 (P=0.003).

## 5.5 Yogur

La Gráfica 4.9, presenta para Alpura el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla a 10, 25 y 35°C, (semana 6). La viscosidad aparente disminuye al aumentar la temperatura.

Se compara la viscosidad aparente (Gráfica 4.10) en función de velocidad de corte (semanas 1, 6, 10), a 25 °C. Las curvas de viscosidad aparente de la semana 1 y 10, algunos puntos se superponen lo que indica que no es significativo el cambio de viscosidad. En la semana 10 la viscosidad disminuye.

Los coeficientes de correlación y determinación (Cuadro 4.20) validan el comportamiento reológico indicado, con base en la Ley de Potencia.

Las muestras analizadas, presentan un comportamiento adelgazante debido a que los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) son menores de uno. El modelo de Ostwald-De Waale presenta valores de 0.990 a 0.999 de coeficiente de correlación (R), lo que confirma el comportamiento reológico de tipo pseudoplástico, de los productos comerciales.

Las muestras presentaron un comportamiento no newtoniano fluidificante por la cizalla, donde la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la cizalla, y su comportamiento corresponde al de un fluido pseudoplástico.

El índice de flujo  $n$  de Alpura, presentan valores de 0.30, 0.41 y 0.43 respectivamente; alejados de la unidad, cercanos entre ellos, y característicos de los materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 10°C fue de 9.31 Pa·s<sup>n</sup>, a 25°C de 3.55 Pa·s<sup>n</sup> y a 35°C de 2.33 Pa·s<sup>n</sup> en el que se observa la disminución de la consistencia por efecto de temperatura. (Cuadros 4.21, 4.22, 4.23).

Los parámetros reológicos en función del tiempo de almacenamiento en el refrigerador, indican, que  $\mathcal{K}$  a 10°C, tuvo una variación de 9.31 a 6.22 Pa·s<sup>n</sup>. Se observa una disminución. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que no hay diferencia significativa en los valores  $\mathcal{K}$  (P=0.117), (Cuadro 4.21).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 10°C fue de 0.30 y 0.35. El análisis estadístico indicó que no existe diferencia significativa entre los valores (P=0.150), por lo que la muestra de Alpura se mantuvo estable a esta temperatura (Cuadro 4.21).

Analizando los resultados de las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ) a 25°C, presenta valores de 3.55 a 1.81 Pa·s<sup>n</sup>, como se puede observar hay una disminución  $\mathcal{K}$ . El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que sí existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$ , en las semanas 1, 3, 6 y 10; por otra parte indica que el índice de consistencia de las semanas 3,6 y 6, 10 son similares (P=0.000) (Cuadro4.22).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 25°C fue de 0.41 a 0.46. El análisis estadístico indicó que existe diferencia significativa entre los valores de las semanas 1, 3, 6 y 10 (P=0.001) (Cuadro 4.22).

Las caracterizaciones reológicas del índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 35°C, varían de 2.33 a 1.07 Pa·s<sup>n</sup>. Se observó una disminución en los valores de  $\mathcal{K}$ . El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$ , presente en la semana 1 (P=0.004) (Cuadro 4.23).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 35°C es de 0.43 a 0.49. El análisis estadístico indica que existe una diferencia significativa entre los valores de las semanas 1, 3, 6 y10, indicando también que el índice de consistencia en la semana 1 y 10, son similares al igual que en las semanas 3,6 y10 (P=0.001) (Cuadro 4.23).

Las Gráfica 11,12 presentan para las marcas Yogur Alpura y Yogur Lala a 25 y 35 °C, el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la velocidad de cizalla. La viscosidad aparente de Alpura y Lala a 25°C, se mantuvo igual y a 35 °C, la viscosidad aparente del Lala disminuyó.

El índice de flujo  $n$  de Lala a las temperaturas 10°C, 25°C y 35°C, presenta valores de  $n$  de 0.36, 0.47 y 0.50 respectivamente, alejados de la unidad, estos valores son cercanos entre ellos, pero característicos de los materiales fluidificantes. El índice de consistencia  $\mathcal{K}$  a 10°C fue de 11.06 Pa·s<sup>n</sup>, a 25°C fue de 3.8 Pa·s<sup>n</sup> y a 35°C 1.94 Pa·s<sup>n</sup> en el que se confirma la disminución de la consistencia por efecto de temperatura. (Cuadros 4.24, 4.25 y 4.26)

Al realizar el seguimiento de los parámetros reológicos del índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ) a 10°C, disminuyó de 11.06 a 5.62 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que sí hay diferencia significativa en los valores  $\mathcal{K}$  (P=0.001), (Cuadro 4.24).

El índice de comportamiento al flujo varía entre 0.36 y 0.47. El análisis estadístico indica que sí existe diferencia significativa entre el valor de la semana 1 y los valores de  $n$  de las otras semanas, observándose un aumento (P=0.002), debido probablemente a un reacomodo de la estructura del yogur marca Lala durante el almacenamiento. (Cuadro 4.24)

Analizando los resultados de las caracterizaciones reológicas, realizadas a 25°C, ( $\mathcal{K}$ ) disminuye de 3.79 a 2.4 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indicando que sí existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$  presentada en la semana 1 con respecto a las otras. (P=0.001) (Cuadro 4.25).

El índice de comportamiento al flujo  $n$  a 25°C, va de 0.47 a 0.49. El análisis estadístico indica que sí existe una diferencia significativa entre los valores de la primera semana (P=0.002) (Cuadro 4.25).

En cuanto a las caracterizaciones reológicas realizadas a 35°C,  $\mathcal{K}$  presenta una disminución 1.94 a 1.13 Pa·s<sup>n</sup>. El análisis estadístico (anova de un solo factor), indica que sí existe diferencia significativa de la  $\mathcal{K}$  (P=0.001) (Cuadro 4.26).

El índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) a 35°C, varía de 0.50 a 0.52. El análisis estadístico indica que no existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos (P=0.078) (Cuadro 4.26), por lo que la muestra se mantuvo estable.

## 6. CONCLUSIONES

Se estudiaron varias muestras comerciales de productos (salsa cátsup marca Del monte, La Costeña y Clemente Jacques; mayonesa marca McCormick y La Costeña; yogur marca Lala y Alpura); a las temperaturas (10, 25 y 35°C), durante varios meses, y se realizaron reogramas para determinar sus propiedades y modificaciones de comportamiento al flujo.

El efecto de las temperaturas en las muestras indica que la viscosidad aparente disminuye, con el aumento de ésta. Para las temperaturas trabajadas en el intervalo de la velocidad de cizalla 0.5 a 400 s<sup>-1</sup>, en los productos, las curvas corresponden a un comportamiento de fluido no newtoniano, ya que no se observó una línea recta en la viscosidad aparente en función a la velocidad de cizalla. El comportamiento reológico se ajusta al modelo de Ostwald-De Waale (Ley de la Potencia). Se observa, por los valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), que todos los productos trabajados presentaron valores menor de la unidad. Esto indica que hay una fluidificación y un comportamiento pseudoplástico de la muestra.

En general, durante la vida de anaquel elegida para el estudio de los producto se conservó el tipo de comportamiento reológico (fluidificante). En la salsa cátsup, su índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ) estuvo variando durante el tiempo de estudio. Puede inferirse que hubo rompimiento de estructura y reestructuración, en este período. En la mayonesa, el índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ), la tendencia fue la disminución de este parámetro, sin embargo, en algunos casos la ( $\mathcal{K}$ ) aumentó, lo que inferir que hubo reestructuración, en este periodo. Para el yogur, el índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ), presenta el mismo comportamiento.

Se indica, por medio del análisis estadístico (anova de un solo factor) que en algunos productos si existieron diferencias significativas entre los valores obtenidos del índice de consistencia ( $\mathcal{K}$ ) y del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), (cátsup, mayonesa, yogur). Por medio de este estudio, también se comprobó, que sí existen diferencias significativas entre las marcas comerciales empleadas, de la salsa cátsup, de la mayonesa y del yogur.

Con este trabajo se afirma la importancia que posee las aplicaciones de la Reología, ciencia de la deformación y flujo de los materiales. Esta disciplina que tiene aplicaciones en todas las áreas de transformación, como es en este caso alimentos, pero que también podría ser en cosméticos, pinturas, productos farmacéuticos, entre otros.

## 7. REFERENCIAS

- Alvarado, J. de D. y Aguilera, J. M. (2001). “*Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*”, Acribia, Zaragoza, España.
- Bandala-Rocha, M. R., Macedo y Ramírez R.C., Vélez Ruiz, J.F. (2005). *Evaluación de Coeficientes de Fricción en el Transporte de Fluidos No-Newtonianos: Información Tecnológica*. Vol. 16.
- Badui, Dergal S. (2013).”*Química de los alimentos*”, 5 ed, Pearson, México.
- Barbosa, Cánovas. (1995). *Rheological characterization of mayonnaise*, Original Research Article, Journal of Food Engineering, Volume 25, issue 3.
- Belitz, H.D. y Grosch W. (1997). “*Química de los Alimentos*”. 2 ed., Acribia, Zaragoza, España.
- Dennis, Laba. (1993). “*Rheological properties of cosmetics and toiletries*”. New York: Marcel Dekker. Vol. 13.
- Camacho Flores, F. J., Tovar Coria, L., Gallardo Navarro Y. “IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos”. [30 párrafos]. Estudio Reológico a Mayonesas Adicionadas de Fibra. 2007. Disponible en: <http://www.respyn.uanl.mx/especiales/2007/ee-12.../CNCA-2007-04.pdf>.
- Duncan, J. (1970).”*Introducción a la química de superficies y coloides*”, España: Alhambra.
- Horst-Dieter, Tscheuschner. (2001). “*Fundamentos de tecnología de los alimentos*”, 2 ed., Acribia, Zaragoza, España.
- Hyes, P.R. (1993) “*Microbiología e higiene de los alimentos*”. Acribia, España.
- Jirgensons, B. y M.E. Straumanis. (1965). “*Compendio de química coloidal*”, 2ª ed., Continental, México.
- Lerche, Martín. (1969). “*Inspección veterinaria de la leche*”. Acribia, España.
- Lewis, M.J. (1993). “*Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado*”, Acribia, Zaragoza, España.
- Macosko, Christopher W. (1994). “*Rheology principles measurements and applications*”. Wiley-VCH, New York.
- Martínez Navarrete, N., Grau A., Chiralt Boix A. (1999). “*Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*”, IPN, México.
- Mechetti, M. y Gómez López, A. “Investigación y Desarrollo”. [8 párrafos]. Propiedades Reológicas de Melados de Caña de Azúcar, [Serie en la Red],

33,2011. Disponible en: Propiedades Reológicas de Melados de Caña de Azúcar. Mechetti, Magdalena; Gómez López, Azucena del R. y Balella, Alberto.

Méndez Montealvo, M.C. y Nuñez Santiago, M.D.C. (2001). "Introducción a la Reología" IPN., México.

Muller, H.G. (1978) "Introducción a la Reología de los alimentos". Acribia, España.

Oma, M., Navas L. "Laboratorio de Tecnología de Alimentos". [18 Párrafos]. Viscosidad, [Serie en la Red], 2013. Disponible en: [http://www.ecured.cu/index.php/Reolog%C3%ADa\\_de\\_los\\_alimentos](http://www.ecured.cu/index.php/Reolog%C3%ADa_de_los_alimentos)  
VISCOSIDA: ..

Paar Physica. "Operating manual for Rheometer Electronics RHEOLAB MC 120" [Manual] Copyright, Physica, 1993. (version 1.0 E Valid from MR2-Firmwareversion 2.00).

Rao, M. A. (1999) "Rheology of fluid and semisolid foods" 2<sup>a</sup> ed. Aspen publication, Gaithersburg, Maryland, USA.

Regalado Méndez, A., Noriega Ramos O. A. "Ciencia y Mar". [35-42 párrafos]. Comportamiento reológico de un fluido, [serie en la red], 36,2008. Disponible en: <http://www.Umar.mx/revistas/36/comportamie>.

Rosenthal Albert I. R., Andrew J. (2001). "Textura de los alimentos Medida y percepción", Acribia, Zaragoza, España.

Sin autor, Disponible en la dirección, [http://www.sabormediterraneo.com/salud/yogur\\_nutr.html](http://www.sabormediterraneo.com/salud/yogur_nutr.html) Septiembre 2015.

Sin autor, Disponible en la dirección, <http://alimentos.org.es/mayonesa-comercial> Septiembre 2015.

Sin autor, Disponible en la dirección, Septiembre 2015. <http://www.dietas.net/tablas-y-calculadoras/tabla-de-composicion-nutricional-de-los-alimentos/salsas-y-condimentos/salsas/ketchup.html>

Sin autor, Disponible en la dirección, Agosto 2015 <https://marcanord.files.wordpress.com/2012/11/reologc3ada-1.pdf>

Sin autor, Disponible en la dirección, julio 2015 <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-021-S-1979.PDF>

Sharma, Shri K., Mulvaney, Steven J. y Rizvi S.S.H. (2003). "Ingeniería de Alimentos": Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Limusa Wiley., México.

Steffe, J. F. (1992). "Rheological methods in food process engineering".  
Fremman, USA.

Tharwat, F. Tadros. (2010). "Rheology of Dispersions", Wiley-VCH Verlag  
GmbH, Weinheim.

Yang, S.C. y L.S., Lai. (2003). "*Dressing and mayonnais, Chemistry of the  
Products dressings and mayonnaise*", 2 a., Encyclopedia of Sciences and  
Nutrition.