

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE  
PULPAS DE FRUTAS Y PRODUCTOS DERIVADOS EN UNA PLANTA  
PROCESADORA DE JUGOS”**

**ASESORES**

---

**Ing. Lucas Álvarez Martínez Ph. D.**  
**Asesor Académico**

---

**Ing. Amarillys Aldana**  
**Asesor Industrial**

**Barcelona, abril de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE  
PULPAS DE FRUTAS Y PRODUCTOS DERIVADOS EN UNA PLANTA  
PROCESADORA DE JUGOS”**

**REALIZADO POR:**  
**TOVAR ELIZBETH MAGDELIS**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO QUÍMICO**

**Barcelona, abril de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE PULPAS  
DE FRUTAS Y PRODUCTOS DERIVADOS EN UNA PLANTA  
PROCESADORA DE JUGOS”**

---

Ing. Lucas Álvarez Martínez, Ph.D.

**Asesor Académico**

---

Ing. Hernán Raven C, M.Sc.

**Jurado Principal**

---

Lic. Ana Ciarfella, Dra.Cs.

**Jurado Principal**

Barcelona, abril de 2010

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

## **DEDICATORIA**

A Dios y a Virgen del Valle por acompañarme en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía en todo momento durante mi carrera y en la elaboración de esta tesis.

Especialmente le quiero dedicar esta tesis a mi abuela por ser esa mujer luchadora como ninguna otra, no tengo palabras para decirte lo especial que eres en mi vida. Siempre serás mi inspiración para alcanzar mis metas, por enseñarme que todo se aprende y que todo esfuerzo tiene al final una recompensa. Tu esfuerzo, se convirtió en tu triunfo y el mío, TE AMO, gracias por existir.

## **AGRADECIMIENTO**

Muchas han sido las personas a las cuales debo parte de este triunfo, quiero dejar constancia de ellas y agradecerles con sinceridad su participación.

Comenzando por las dos mujeres que han sido pilares fundamentales en mi vida, mi Abuela y mi mamá. Gracias por todos los sacrificios que han hecho para ayudarme durante mi carrera. Juntas me han ayudado a alcanzar este triunfo. Soy afortunada de tener dos madres como ustedes, sin su apoyo no hubiese podido alcanzar este sueño, MI SUEÑO, que ahora es una realidad. Gracias por su paciencia y por creer en mí, son una bendición en mi vida. Este logro es de ustedes!!!

A Félix y a la familia Colmenares por ayudarme a conseguir mis pasantías y apoyarme durante todo ese tiempo, sin su apoyo no lo hubiese logrado.

Al profesor Lucas Álvarez por su gran apoyo y cordialidad durante todo este tiempo de elaboración de la tesis. Por sus palabras de ánimo, por haber creído en mí y por sus sabios consejos en todo momento.

A Empresas Polar por brindarme la oportunidad de hacer mis pasantías en sus instalaciones. Gracias a todo el grupo del Centro Tecnológico por recibirme, especialmente a Lidia, Omar, Yanetxi, Mildred, Hector, Johan, Lisbeth, Mariana, Beatriz, Luis David, Carlos, Ceneiris, Sra. Irene, Sra. Milagros y Mileydis, gracias chicos por apoyarme durante todo el periodo de pasantía, por compartir sus conocimientos conmigo y por hacerme sentir una más del grupo.

A Amarillys y José Juan por asesorarme y ayudarme en la realización de este tesis. Gracias por su paciencia al momento de explicarme, dedicarme tiempo entre tantas ocupaciones y su aporte.

A Francis por ser más que una amiga para mí, eres mi hermana! Te agradezco todo el apoyo que me has brindado en los malos y buenos momentos. Gracias por acompañarme cuando más lo necesito, por saber entenderme y por soportarme todos estos años (y los que faltan). Juntas hemos vivido momentos de alegrías, tristezas, lágrimas y triunfos que serán inolvidables para mí. Gracias por ser mi amiga te quiero mucho..!!!

A Marllelyn, por apoyarme incondicionalmente y hacerme ver las cosas de la manera más sencilla. Muchas gracias por entenderme y estar conmigo cuando más he necesitado. Este éxito es solo el principio de todo lo que nos espera juntas...!!!

A todos mis compañeros y amigos durante la carrera gracias Cristian, Franklin, Jessica, Jean, Tawil y Angie por las experiencias vividas. Con ustedes he aprendido el significado de la verdadera amistad.

A Ruben, Ana, Carlos Ortiz, Adrian, Wladimir y Alejandro por el apoyo brindado en la última fase de este trabajo.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio enfocado a evaluar las propiedades reológicas de pulpas de frutas y productos derivados en una planta industrial productora de jugos y néctares, a los fines de mejorar el control de calidad de dichos productos (identificados desde A hasta E) durante las operaciones de elaboración. Los objetivos específicos del trabajo fueron: comparar diferentes metodologías de análisis de viscosidad mediante viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield utilizadas en la industria para jugos y néctares de frutas; caracterizar los parámetros reológicos de las diferentes pulpas de frutas empleadas en la elaboración industrial de jugos y néctares; y evaluar el efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de las pulpas, jugos y néctares de frutas. Después de aplicar las metodologías mencionadas, los resultados revelaron que la viscosimetría copas Ford es más apta para fluidos con comportamiento Newtoniano, y que la metodología Brookfield se aplica a fluidos Newtonianos y no-Newtonianos. Los resultados obtenidos con la Copa Ford N° 2 fueron más confiables que los obtenidos con la Copa Ford N° 4. También se concluyó que la viscosidad para los jugos y néctares disminuye con el aumento de la temperatura, y el néctar B presentó mayor sensibilidad en la variación de su viscosidad respecto a los cambios de temperatura. Entre 0 y 25 °C las pulpas estudiadas exhibieron comportamiento reológico no-Newtoniano tipo plástico de Bingham, y se ajustaron según el modelo de Heschel-Bulkley, generalmente a satisfacción aceptable. En el rango de temperatura estudiado, el índice de comportamiento de flujo de la pulpa A fue máximo y el de la pulpa C ligeramente superior a los de las pulpas B, D y E. las dependencias del índice de consistencia y del esfuerzo cedente en función de la temperatura revelaron que al cambiar la temperatura, estos parámetros reológicos se pueden modificar más fácilmente en las pulpas C y D, y más difícilmente en la pulpa A.

# CONTENIDO

<b>RESOLUCIÓN.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VIII</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>EL PROBLEMA.....</b>	<b>13</b>
1.1 RESEÑA HISTÓRICA .....	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.3. OBJETIVOS .....	16
<i>1.3.1 Objetivo general.....</i>	<i>16</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>16</i>
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>17</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	18
2.2.1 <i>Néctar de frutas.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Jugo.....</i>	<i>19</i>
2.2.3 <i>Materias primas.....</i>	<i>19</i>
2.2.3.1 <i>Pulpa de fruta.....</i>	<i>19</i>
2.2.3.2 <i>Azúcar.....</i>	<i>20</i>
2.2.3.3 <i>Agua.....</i>	<i>20</i>
2.2.3.4 <i>Ácidos orgánicos.....</i>	<i>20</i>
2.2.3.5 <i>Aceites esenciales y aromatizantes.....</i>	<i>20</i>
2.2.3.6 <i>Estabilizantes.....</i>	<i>21</i>
2.2.4 <i>Preparación.....</i>	<i>21</i>

2.2.4.1 Mezclado de los ingredientes.....	21
2.2.4.2 Pasteurización.....	21
2.2.4.3 Envasado y empacado .....	22
2.2.5 Reología .....	22
2.2.5.1 Diseño de procesos y equipos en ingeniería .....	22
2.2.5.2 Evaluación sensorial.....	23
2.2.5.3 Obtener información sobre la estructura del alimento .....	23
2.2.5.4 Control de calidad.....	23
2.2.6 Fluido .....	23
2.2.6 Determinación de las propiedades reológicas .....	24
2.2.6.1 Esfuerzo de corte .....	24
2.2.6.2 Velocidad de deformación.....	25
2.2.6.3 Viscosidad .....	26
2.2.8 Clasificación de los alimentos según su comportamiento reológico.....	27
2.8.1 Fluidos Newtonianos.....	28
2.8.2 Fluido no-Newtoniano.....	29
2.8.2.1 Fluidos sin esfuerzo umbral o inicial.....	30
2.8.2.2. Fluidos con esfuerzo umbral o inicial (plásticos) .....	32
2.9 REOLOGÍA EN FLUIDOS ALIMENTARIOS .....	32
2.10 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO .....	34
2.10.1 Efecto de la temperatura .....	34
2.11 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS .....	35
2.11.1 Cilindros concéntricos.....	36
2.11.2 Cono y plato .....	38
2.11.3 Platos paralelos.....	39
2.11.4 Reómetro o viscosímetro del tubo .....	41
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>43</b>
<b>DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b>	<b>43</b>
3.1. Comparación de metodologías de análisis de viscosidad (viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield) en jugos y néctar de frutas.....	43
3.1.1. Medición con la Copa Ford.....	43
3.1.2. Medición con el viscosímetro de Brookfield.....	45
3.1.3. Criterios de comparación entre viscosimetrías Copa Ford y Brookfield.....	46
3.1.4. Comparación entre resultados con Copas Ford N° 2 y N° 4 .....	47

3.1.5 Cálculo de la viscosidad dinámica.....	47
3.2. Caracterización de las propiedades reológicas de las pulpas de frutas empleadas en la elaboración de jugos y néctares .....	48
3.2.1 Conversión de lecturas a función de viscosidad en el viscosímetro de Brookfield, modelo RVT.....	48
3.2.2 Cálculos de las propiedades reológicas de las pulpas.....	51
3.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DE LAS PULPAS, JUGOS Y NÉCTARES DE FRUTAS .....	53
3.3.1. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los jugos y néctares de frutas.....	53
3.3.1. Efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia de las pulpas de frutas..	54
3.3.2. Muestra de cálculos.....	55
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>57</b>
<b>DISCUSIÓN DERESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
4.1 Comparación de las diferentes metodologías de análisis de viscosidad (viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield) utilizadas en la industria para jugos y néctares de frutas.....	57
4.1.1 Copas Ford N° 2 y N° 4.....	58
4.2 Caracterización de los parámetros reológicos de las diferentes pulpas de frutas empleadas en la elaboración industrial de jugos y néctares .....	60
4.3 Evaluación del efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de los jugos, néctares y pulpas de frutas .....	62
4.3.1. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad para los diferentes jugos y néctares	62
4.3.2. Efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia para las pulpas de frutas .....	65
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>73</b>
<b>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO: .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE FLUIDO <sup>[13]</sup> .....	34
TABLA 3.1. ECUACIONES PARA LA CONVERSIÓN DEL TIEMPO (SEGUNDOS) VISCOSIDAD CINEMÁTICA (CENTISTOKES) <sup>[36]</sup> .....	44
TABLA 3.2. FACTORES DE CONVERSIÓN PARA LAS AGUJAS EN UN VISCOSÍMETRO DE.....	50
TABLA 3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD .....	54
TABLA 3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES .....	55
TABLA 3.5. VISCOSIDADES DINÁMICAS PARA EL NÉCTAR .....	55
TABLA 4.1. COMPARACIÓN ENTRE LAS METODOLOGÍAS BROOKFIELD Y COPA FORD. ....	57
TABLA 4.2. VALORES DE VISCOSIDAD DINÁMICA PARA JUGOS Y NÉCTARES	59
TABLA 4.3. VALORES DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.....	61
TABLA 4.4. DATOS DE VISCOSIDAD DINÁMICA DE LOS JUGOS Y .....	62
TABLA 4.5. TÉRMINOS CALCULADOS A PARTIR DEL AJUSTE DE LA ECUACIÓN DE .....	65
TABLA 4.6. VALORES DE ÍNDICE DE CONSISTENCIA Y .....	65
TABLA 4.7. VALORES DE LA CONSTANTE DE ARRHENIUS PARA EL ÍNDICE DE .....	68

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1.ORGANIGRAMA GENERAL SIMPLIFICADO DE EMPRESAS POLAR</b>	14
<sup>[2]</sup> .....	
<b>FIGURA 1.2.ORGANIGRAMA GENERAL PEPSICOLA DE VENEZUELA, C.A <sup>[2]</sup>....</b>	14
<b>FIGURA 2.1. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD <sup>[21]</sup>.....</b>	25
<b>FIGURA 2.2. CURVAS DE VISCOSIDAD PARA UN FLUIDO.....</b>	29
<b>FIGURA 2.3. DIFERENTES TIPOS DE FLUIDOS <sup>[13]</sup>.....</b>	30
<b>FIGURA 2.4. CURVAS DE VISCOSIDAD PARA UN FLUIDO.....</b>	31
<b>FIGURA 2.5 CURVAS DE VISCOSIDAD APARENTE PARA UN FLUIDO.....</b>	31
<b>FIGURA 2.6. CURVAS DE VISCOSIDAD PARA UN FLUIDO PLÁSTICO. ....</b>	32
<b>FIGURA 2.7. CILINDROS CONCÉNTRICOS.....</b>	36
<b>FIGURA 2.8. CONO Y PLACA .....</b>	38
<b>FIGURA 2.9. PLATOS PARALELOS.....</b>	40
<b>FIGURA 2.10. VISCOSÍMETRO CAPILAR .....</b>	41
<b>FIGURA 3.1.A) VISTA DE COPA FORD, B) DIMENSIONES DE LAS COPAS FORD</b>	
<b>Nº 2 Y Nº4 <sup>[35]</sup> .....</b>	44
<b>FIGURA 3.2. DENSITÓMETRO ANTON PARR .....</b>	45
<b>FIGURA 3.3. VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD (A) Y SUS RESPECTIVAS</b>	
<b>AGUJAS (B). ....</b>	46
<b>FIGURA 3.4. GRÁFICA DE CONVERSIÓN DE VARIABLES A FUNCIONES DE</b>	
<b>VISCOSIDAD.....</b>	51
<b>FIGURA 3.4. ESFUERZO DE CORTE VS. VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN PARA</b>	
<b>.....</b>	52
<b>FIGURA 3.5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MODELO DE HERSHEL</b>	
<b>BUKLEY.....</b>	53
<b>FIGURA 3.6. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE ARRHENIUS</b>	56

<b>FIGURA 4.1. COMPARACIÓN DE VISCOSIDADES DINÁMICAS PARA.....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 4.2. VISCOSIDAD PARA JUGOS Y.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 4.3. ÍNDICE DE CONSISTENCIA PARA LAS PULPAS A DIFERENTES TEMPERATURAS. ....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.4. ESFUERZO DE CEDENCIA PARA LAS PULPAS A DIFERENTES TEMPERATURAS. ....</b>	<b>67</b>



# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Reseña histórica

La trayectoria de Empresas Polar comenzó hace más de cien años, con la fábrica de velas y jabones Mendoza & Compañía. Allí, alrededor del año 1939, Lorenzo Alejandro Mendoza Fleury, socio mayoritario de esa firma familiar decidió ampliar las dimensiones del negocio y hacer realidad el proyecto de establecer una industria cervecera en Venezuela.

Cuando estalló la Segunda Guerra Mundial, un barco mercante con destino a La Guaira quedó fondeado en el puerto de Hamburgo. La decisión crucial de zarpar, corriendo el riesgo de hundimiento, llevó a puerto seguro la primera paila de cocimiento y otros equipos adquiridos para instalar Cervecería Polar <sup>[1]</sup>.

Cervecerías Polar, C.A fue inaugurada en 1941 con 50 trabajadores y sus instalaciones estaban en la Parroquia Antímamo de Caracas. En 1950 se inauguró la planta ubicada en Barcelona, estado Anzoátegui, la cual contaba con una capacidad de 500 mil litros de producción y con apenas 57 trabajadores. La tercera planta se inauguró en Caracas en 1951, con una cantidad aproximada de 140 trabajadores y capacidad de producción de 500 mil litros mensuales de producto. La cuarta planta de Cerveza comenzó sus operaciones en 1961 en Maracaibo, y es conocida como "La planta Modelo". La misma abastece la zona occidental del país produciendo 4 millones de litros mensuales y manejados por 115 empleados. En 1978 se abre la quinta planta de Polar, esta vez en San Joaquín estado Carabobo, con una capacidad de 12 millones de litros por mes <sup>[1]</sup>.

En 1994 Empresas Polar inauguró el Centro Tecnológico como laboratorio para controlar y aumentar la calidad de los productos. También Polar estableció una alianza con *PepsiCo* para la producción y distribución del producto Pepsi alrededor del país y para el año 2000 Empresas Polar concentró todo su negocio de bebidas refrescantes no carbonatadas,

entre ellas los jugos Yukery y agua mineral Minalba en Pepsi-Cola Venezuela y además lanzaron una nueva cerveza ligera llamada Polar Ice <sup>[1]</sup>.

En las figuras 1.1 y 1.2 se presentan los organigramas de la dirección de Empresas Polar.

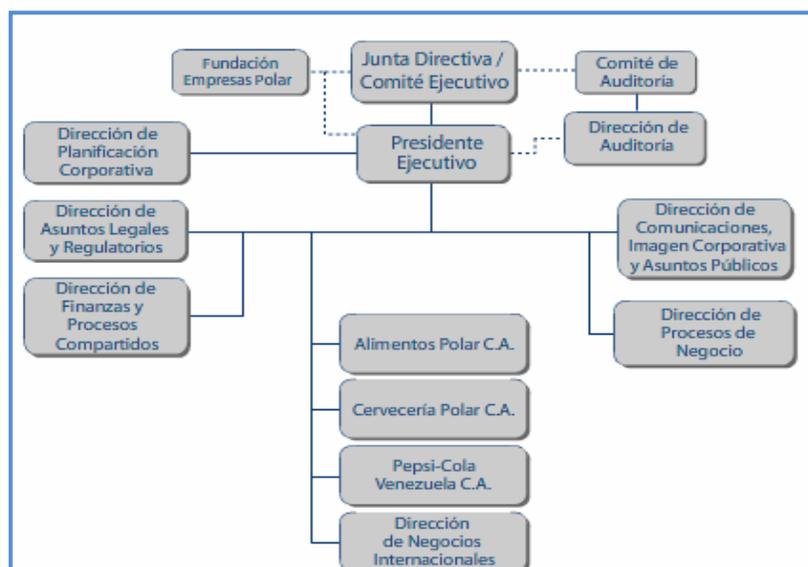


Figura 1.1. Organigrama general simplificado de Empresas Polar <sup>[2]</sup>.

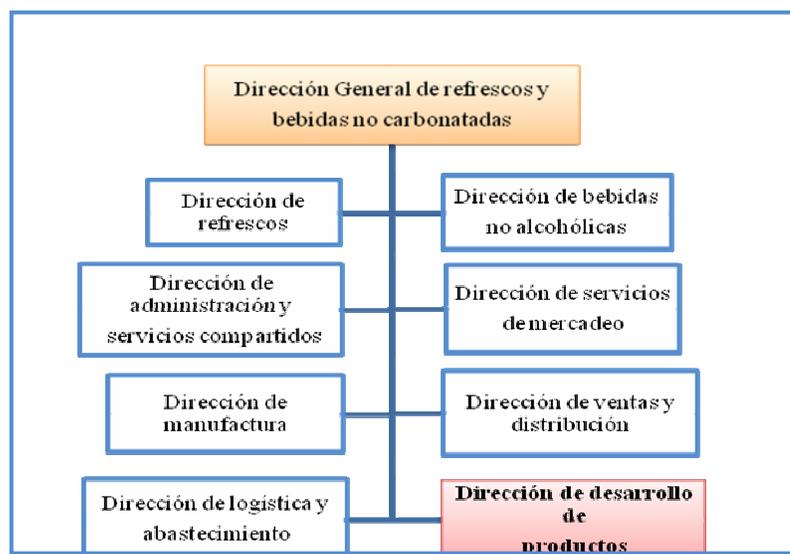


Figura 1.2. Organigrama general Pepsicola de Venezuela, C.A <sup>[2]</sup>

## 1.2 Planteamiento del problema

Fue en el año 2000 bajo el nombre de PepsiCola de Venezuela cuando Empresas Polar se concentró en el área de refrescos y bebidas no carbonatadas tales como refrescos y productos Yukery.

En el caso de los productos Yukery que son a base de pulpas de frutas, existen diferentes parámetros a ser considerados al momento de evaluar su calidad. La viscosidad, tanto de las pulpas de frutas como de sus productos derivados, puede ser utilizada como indicador del adecuado procesamiento y elaboración de las bebidas; e igualmente es una característica apreciada por el consumidor, que pudiese influir en la aceptabilidad o rechazo de los productos comerciales obtenidos.

Se tiene cierta incertidumbre con el instrumento de medición de viscosidad que está siendo utilizado para los productos Yukery. Esto ha motivado a la Gerencia de Desarrollo de Productos de PepsiCola de Venezuela, C.A. (planta de Caracas), a realizar una comparación entre diferentes métodos de medición de viscosidad (viscosímetro rotacional Brookfield y Copa Ford), para poder seleccionar el método más exacto en las mediciones de viscosidades de los jugos y néctares.

Adicionalmente se ha hecho necesario estudiar, las propiedades reológicas de las pulpas de frutas basadas en los parámetros índice de comportamiento ( $n$ ) e índice de consistencia ( $k$ ) de flujo, para llevar a cabo el diseño de una planta transportadora de pulpas de frutas; ya que estas propiedades son de gran importancia para el diseño de procesos y equipos de ingeniería, tales como: tuberías, bombas para el manejo de los alimentos, transporte, etc.

A su vez se ha considerado conveniente evaluar el efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos, ya que las pulpas, jugos y néctares son sometidos continuamente a cambios de temperatura, comenzando por el proceso de elaboración y pasando por los períodos de transporte y almacenamiento. Por este motivo es muy importante conocer sus propiedades reológicas en función de la temperatura y para lo cual en este trabajo se ha planteado los siguientes objetivos:

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar las propiedades reológicas de pulpas de frutas y productos derivados en una planta productora de jugos.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Comparar diferentes metodologías de análisis de viscosidad (viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield) utilizadas en la industria para jugos y néctares de frutas.
2. Caracterizar los parámetros reológicos de las diferentes pulpas de frutas empleadas en la elaboración industrial de jugos y néctares.
3. Evaluar el efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de las pulpas, jugos y néctares de frutas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

Belibagli y Dalgic (2007) <sup>[3]</sup> determinaron las propiedades reológicas del concentrado de jugo de cereza a partir del uso de un reómetro con control de esfuerzo de corte. El comportamiento reológico del jugo de cereza con diferentes contenidos de sólidos disueltos (40 a 70 °Bx) fue estudiado a temperaturas entre 5 y 50° C. Se encontró que el comportamiento del fluido fue no-Newtoniano. El efecto de la temperatura en la viscosidad fue descrito mediante la ecuación de Arrhenius. Las energías de activación resultaron entre 22,44 y 73,49 kJ/mol en relación al aumento de la concentración de sólidos. Para el estudio del efecto de la concentración sobre la viscosidad se utilizaron la ecuación exponencial y la ley de la potencia. Finalmente se obtuvieron dos ecuaciones que combinadas describen el efecto de la temperatura y de los sólidos solubles sobre la viscosidad de los concentrados de jugos de cereza.

Kawazoe y Cunha (2007) <sup>[4]</sup>, estudiaron el comportamiento reológico para una variedad de la fruta de jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) a temperaturas de 5, 25, 45, 65 y 85 °C, sometida a ensayos en estado estacionario (0 a 300 s<sup>-1</sup>). El modelo de Herschel-Bukley fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales ( $R^2 > 0,98$ ). Al incrementar la temperatura se obtuvo una disminución del índice de consistencia (k) y un leve aumento del índice de comportamiento de flujo (n), al aplicar la ecuación de Arrhenius se obtuvo una energía de activación de 3,11 kcal/gmol y una constante de Arrhenius de -5,942 Pa.s<sup>n</sup>.

Dak y colaboradores (2006) <sup>[5]</sup> estudiaron las características del flujo del jugo de mango y evaluaron los parámetros reológicos utilizando un viscosímetro rotacional a temperaturas entre 20 y 70 °C, en el intervalo de 11,69 y 26 % de sólidos totales. A partir de

los resultados experimentales se determinó que el mejor ajuste se obtuvo con la ley de la potencia, resultando valores para el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) menores que la unidad (0,20–0,33) para todas las temperaturas y concentraciones, revelando el comportamiento pseudoplástico del jugo. Una correlación entre el coeficiente de consistencia y el inverso de la temperatura absoluta en el rango  $0,32 - 80,09 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$  fue obtenida a partir de la ecuación de Arrhenius. La ley de potencia indicó que el índice de consistencia decrece de manera no lineal con respecto a la concentración. Se encontró que la energía de activación estuvo en el rango de 3,8 a 13,7 kJ/mol.

Mossel y colaboradores (2000) <sup>[6]</sup>, determinaron la viscosidad de varias mieles australianas no procesadas usando un viscosímetro rotacional Brookfield, modelo DVIII a tasas de deformación correspondientes a 1, 25 y 50 rpm, en un rango de temperatura entre 10 – 40 °C. Evaluaron el efecto de la temperatura sobre la viscosidad usando la ecuación de Arrhenius obteniendo un coeficiente de correlación mayor a 0,96, resultando valores de energías de activación ( $E_a$ ) en el intervalo de 66,315 a 124,493 J/g y de las constantes de Arrhenius entre  $7,99\text{E}-22$  y  $1,56\text{E}-11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Alvarado (1992) <sup>[7]</sup> determinó la viscosidad de jugos filtrados de doce frutas, además de las viscosidades del jugo de caña de azúcar, remolacha y zanahoria; empleando viscosímetro Ostwald en un intervalo de temperatura de 10 a 80 °C. Comprobó que los jugos cumplían la ley de Arrhenius y se calculó la energía de activación para cada uno, cuyos valores estuvieron comprendidos entre 16,5 kJ/mol para el jugo de lima y 23,7 kJ/mol para el jugo de babaco (papaya o lechosa).

## **2.2 Fundamentos teóricos**

### **2.2.1 Néctar de frutas**

Según la norma COVENIN 1030 <sup>[8]</sup> el néctar es un producto fermentable pero no fermentado, obtenido por la adición de agua y azúcares a los jugos de frutas y/o vegetales, sus

concentrados, pulpas, pulpas concentradas o sus mezclas, cuyo contenido mínimo de sólidos de frutas debe ser específico en cada una de las normas individuales.

El néctar no es un producto estable por sí mismo; es decir, necesita ser sometido a un tratamiento térmico adecuado para asegurar su conservación. Es un producto formulado que se prepara de acuerdo a una receta o fórmula preestablecida, y que puede variar de acuerdo a las preferencias de los consumidores <sup>[9]</sup>.

### **2.2.2 Jugo**

Es el producto líquido fermentable, pero no fermentado, obtenido por procedimientos mecánicos y/o enzimáticos, a partir de las frutas y/o vegetales maduros, sanos y limpios, con color, aroma y sabor típicos de la fruta y/o vegetal del que procede <sup>[8]</sup>.

La diferencia entre néctar y jugo de frutas es que este último es el líquido obtenido al exprimir algunas clases de frutas frescas, por ejemplo los cítricos, sin diluir, concentrar ni fermentar, o los productos obtenidos a partir de jugos concentrados, clarificados, congelados o deshidratados a los cuales se les ha agregado solamente agua, en cantidad tal que restituya la eliminada en su proceso <sup>[9]</sup>.

### **2.2.3 Materias primas**

Los ingredientes y aditivos utilizados en la elaboración de estos productos deben cumplir con los requisitos establecidos en las normas venezolanas COVENIN y en las disposiciones sanitarias correspondientes. A continuación se presenta la materia prima utilizada para la producción de néctares de frutas:

#### **2.2.3.1 Pulpa de fruta**

La pulpa se obtiene a partir de frutas maduras, sanas y frescas, las cuales pasan a través de una etapa de pulpeado, en donde la fruta es triturada, después de pelada, hasta obtenerse una pasta de dicha fruta <sup>[8]</sup>.

#### **2.2.3.2 Azúcar**

Los néctares en general contienen dos tipos de azúcares: el azúcar natural que aporta la fruta y el azúcar que se incorpora adicionalmente. El azúcar le confiere al néctar el dulzor característico. La norma COVENIN de néctares permite como edulcorantes, además de la sacarosa (azúcar), la fructosa y la glucosa. Estas últimas son formas de azúcar que se encuentran en las frutas y en la miel, y se pueden definir como monosacáridos (azúcares simples), los cuales tienen la misma fórmula empírica, pero con diferente estructura <sup>[8]</sup>.

#### **2.2.3.3 Agua**

El agua empleada en la elaboración de néctares deberá ser potable, libre de impurezas y baja en sales. Para este fin se puede recurrir al uso de equipos que aseguren una óptima calidad del agua, como con los filtros y los purificadores. La calidad de agua que se debe incorporar al néctar se calcula según el peso de la pulpa o jugo y de las características de la fruta <sup>[8]</sup>.

#### **2.2.3.4 Ácidos orgánicos**

Se pueden utilizar ácidos orgánicos (cítrico, málico, entre otros) como reguladores de pH, cantidades limitadas por las buenas prácticas de manufactura <sup>[8]</sup>. Por otro lado, los ácidos orgánicos también tienen la función de aportar valor nutritivo al producto, como es el caso del ácido ascórbico, que es el nombre científico de la vitamina C. Para saber si el jugo o la pulpa diluida poseen la acidez apropiada, se debe medir su grado de acidez titulable <sup>[10]</sup>.

#### **2.2.3.5 Aceites esenciales y aromatizantes**

Los volátiles que se recogen durante la concentración de los zumos se llaman esencias y se dividen en dos grupos: solubles en agua y solubles en aceite. La parte soluble en agua se conoce como aroma y la soluble en aceite como aceite esencial. Las dos tienen compuestos aromáticos con olor a flores o a fruta. Su función es la de compensar las pérdidas de los volátiles por el tratamiento térmico del producto final <sup>[9]</sup>.

#### **2.2.3.6 Estabilizantes**

Los estabilizantes son sustancias que posibilitan el mantenimiento de una dispersión uniforme de dos o más sustancias no miscibles en el néctar, por lo que su principal función es mantener la suspensión del néctar y regular su densidad a través de agentes de retención de humedad <sup>[8]</sup>. A la hora de comercializar un alimento ya elaborado, se valora mucho que tenga la textura que el producto y el cliente requiere. Los estabilizantes cumplen esa función <sup>[11]</sup>.

#### **2.2.4 Preparación**

El proceso de producción de los néctares y jugos de frutas consta de tres etapas principales que se describen a continuación:

##### **2.2.4.1 Mezclado de los ingredientes**

En un tanque de mezclado, primero se adiciona el agua y luego se procede a agregar el azúcar con el estabilizante, para facilitar la disolución del estabilizante. Seguidamente se incorporan los demás ingredientes, los ácidos orgánicos, la pulpa y la esencia, y se continúa agitando hasta alcanzar una mezcla lo más homogénea posible. En esta etapa se realiza un seguimiento de las propiedades del producto para satisfacer los parámetros de producción, realizando la medición de las propiedades fisicoquímicas y evaluación de los atributos sensoriales del producto.

##### **2.2.4.2 Pasteurización**

La siguiente etapa es la pasteurización, la cual consiste en un tratamiento térmico en donde el producto es sometido a una combinación de tiempo-temperatura de manera de poder destruir las bacterias patógenas y deteriorativas que puedan existir en el mismo. El rango de temperatura recomendado es 89 a 94 °C.

#### **2.2.4.3 Envasado y empaçado**

La etapa final en la producción de los néctares de fruta es el envasado y empaçado. El envasado se lleva a cabo en un equipo especialmente preparado para el tipo de presentación final que se vaya a utilizar. Luego, estos envases son organizados en cajas, con un número específico de éstos, para ser transportados a los diferentes puntos de ventas.

#### **2.2.5 Reología**

La reología es la ciencia del flujo y deformación de la materia <sup>[12]</sup>. Abarca el estudio de todos los materiales, desde gases a sólidos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes <sup>[13]</sup>. También se puede definir a la reología como una ciencia disciplinaria cuyo desarrollo realizan no solamente físicos, sino también ingenieros de diversas especialidades, matemáticos, químicos, biólogos, farmacéuticos, etc.; lo cual da lugar a diferentes métodos, así como un amplio abanico de posibilidades prácticas de aplicación <sup>[14]</sup>. El conocimiento adecuado de las propiedades reológicas de los alimentos es muy importante por numerosas razones, entre las que destacan las aplicaciones que se detallan a continuación:

##### **2.2.5.1 Diseño de procesos y equipos en ingeniería**

El conocimiento de las propiedades de comportamiento al flujo y de deformación de los alimentos son imprescindibles en el diseño y dimensionamiento de equipos tales como cintas transportadoras, tuberías, tanques de almacenamiento, pulverizadores o bombas para el manejo de alimentos <sup>[15]</sup>. Además, la viscosidad se utiliza para la estimación y cálculo de los fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, calor y energía <sup>[16]</sup>.

### **2.2.5.2 Evaluación sensorial**

Los datos reológicos pueden ser muy interesantes para modificar el proceso de elaboración o la formulación de un producto final, de manera que los parámetros de textura del alimento se encuentren dentro del rango considerado deseable por los consumidores <sup>[17]</sup>.

### **2.2.5.3 Obtener información sobre la estructura del alimento**

Los estudios reológicos pueden aportar información que facilite una mejor comprensión de la estructura o de la distribución de los componentes moleculares de los alimentos, especialmente de los procesos de acondicionamiento y elaboración a los que son sometidos <sup>[17]</sup>.

### **2.2.5.4 Control de calidad**

Las medidas de la viscosidad son cada vez más importantes en muchas industrias alimentarias con el objeto de controlar el buen funcionamiento del proceso productivo, así como la calidad de las materias primas, productos intermedios y acabados <sup>[18]</sup>.

## **2.2.6 Fluido**

Se define fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte. Los fluidos pueden clasificarse de manera general, de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de deformación. En la figura 2.1 se muestra cuando se somete un fluido a un esfuerzo de corte, experimentando una relación de deformación (relación o tasa de corte) <sup>[10]</sup>. Como fluido se entiende toda porción de materia capaz de deformarse continuamente cuando es sujeta a una fuerza o deformación, a diferencia de los sólidos, los cuales o no se deforman o sólo se deforman hasta cierto punto. Son fluidos

todos los líquidos, los gases y otros fluidos de composición más compleja tales como las emulsiones y suspensiones, las pastas y los polímeros fundidos, entre otros <sup>[19]</sup>.

### 2.2.6 Determinación de las propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de un fluido forman parte de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial. Frecuentemente, ellas determinan las propiedades funcionales de algunas sustancias e intervienen durante el control de calidad, los tratamientos (comportamiento mecánico), el diseño de operaciones básicas como bombeo, mezclado y envasado, almacenamiento y estabilidad física, e incluso en el momento del consumo (textura).

Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo. Todo fluido se va a deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas. Dicho sistema de fuerzas se representan matemáticamente mediante el esfuerzo cortante o velocidad de flujo de cantidad de movimiento ( $\tau$ ), mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad o tasa de deformación o de cizallamiento ( $\dot{\gamma}$ ) <sup>[20]</sup>.

#### 2.2.6.1 Esfuerzo de corte

Se define el esfuerzo de corte o cizalla ( $\tau$ ) como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación dada (ecuación 2.1). La unidad de esta magnitud más comúnmente utilizada es el Pascal (Pa) <sup>[21]</sup>.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte (Pa),  $F$  es la fuerza (N) y  $A$  es el área ( $m^2$ ).

Por otra parte típicamente hablando en flujos de fluidos, el significado de  $\tau$  equivale a la velocidad de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área  $\left(\frac{m \cdot v}{A}\right)$  la cual tiene unidades de  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$ .

### 2.2.6.2 Velocidad de deformación

La velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) se define como el cambio de velocidad  $v$  a través de la distancia  $h$  entre dos platos (ecuación 2.2) <sup>[21]</sup>. Tiene como unidad el inverso del tiempo, donde el más comúnmente usado es el  $s^{-1}$ . La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad de la placa superior aumenta y la distancia entre las placas se hace más pequeña (figura 2.1) <sup>[22]</sup>.

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v}{\partial h} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte ( $s^{-1}$ ),  $\partial v$  es el diferencial de velocidad (m/s) y  $h$  es la distancia entre las placas (m). Por otro lado, el fluido entre las placas resiste el movimiento de la placa superior, y esta resistencia al flujo es determinada por la viscosidad del fluido ( $\mu$ ) figura 2.1 <sup>[21]</sup>.

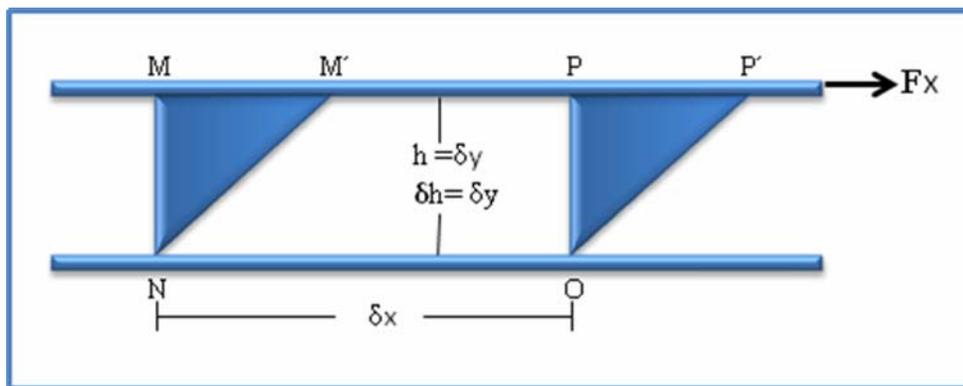


Figura 2.1. Distribución de velocidad <sup>[21]</sup>.

Siendo  $F_x$  la fuerza aplicada,  $\overline{MM'}$ ,  $\overline{PP'}$ ,  $\overline{NO}$  las distancias entre dos puntos respectivos;  $\delta y$  y  $\delta x$  representan los diferenciales de  $y$  y  $x$ , respectivamente.

### 2.2.6.3 Viscosidad

Es una propiedad reológica muy importante que mide la resistencia a la deformación del fluido <sup>[23]</sup>. Otra forma de definir la viscosidad es como la relación entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la tasa de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) adoptada por el fluido; tal como se muestra en la ecuación 2.3

$$\mu = - \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad (Pa.s) o (kg/m.s) en el sistema internacional de unidades.

En general, existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad absoluta, que representa la viscosidad dinámica del líquido y es un término muy utilizado para fines prácticos <sup>[19]</sup>; la viscosidad aparente, término que se utiliza al hablar de viscosidad para fluidos no Newtonianos, ya que el valor de esta propiedad dependerá de la velocidad de deformación adoptada por el fluido. La viscosidad cinemática, que es cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad <sup>[20]</sup>, ecuación (2.4):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinética en centiStokes,  $\mu$  es la viscosidad dinámica en centipoises y  $\rho$  es la densidad ( $\text{g/cm}^3$ ) del fluido.

- **Variación de la viscosidad con la temperatura**

Existen varios modelos que permiten evaluar la variación de la viscosidad de un líquido al cambiar la temperatura. Sin embargo la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.5) es la más usada para determinar el efecto que tiene la temperatura sobre la viscosidad <sup>[24]</sup>.

La ecuación de Arrhenius

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

La cual en su forma linealizada es (ecuación 2.6)

$$\ln k = \ln A + \frac{E_a}{RT} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

k (T): entidad cinética equivalente a viscosidad dependiente de la temperatura ( $\mu$ )

A: factor o constante preexponencial

Ea: energía de activación (J/mol)

R: constante universal de los gases (8,314 J/mol<sup>o</sup>K)

T: temperatura absoluta [°K]

Como se ve en la ecuación, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho de que, conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad. Por este hecho se deben extremar las precauciones a la hora de medir la viscosidad, teniendo en cuenta que la temperatura debe permanecer prácticamente constante <sup>[24]</sup>.

### 2.2.8 Clasificación de los alimentos según su comportamiento reológico

Para una mayor comprensión de los problemas que se plantean en el estudio de las propiedades reológicas de los alimentos, a continuación se presentan una clasificación de los diversos alimentos fluidos habituales, según su comportamiento reológico.

De modo general, la mayoría de los autores coinciden al hacer una primera clasificación entre fluidos Newtonianos y no-Newtonianos, según su comportamiento reológico siga o no la Ley de Newton de la viscosidad. Además existen alimentos en los que su comportamiento depende del tiempo de actuación del esfuerzo realizado sobre ellos.

Finalmente, existe otro grupo de alimentos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, es decir fluidos viscoelásticos <sup>[25]</sup>.

La ecuación de la Ley de Newton de viscosidad de un fluido es (ecuación 2.7)

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante (Pa),  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido (Pa.s) y  $du/dy$  es la velocidad de deformación del fluido ( $s^{-1}$ ) =  $\dot{\gamma}$ .

Así, la clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

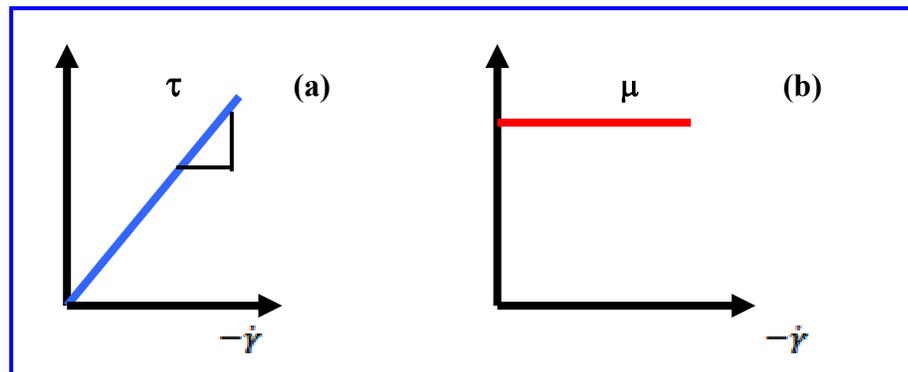
- ✓ Fluidos Newtonianos.
- ✓ Fluidos no-Newtonianos.
  - Independientes del tiempo.
    - Plásticos de Bingham.
    - Pseudoplásticos.
    - Dilatantes.
  - Dependientes del tiempo.
    - Fluidos tixotrópicos.
    - Fluidos reopéticos.
- ✓ Fluidos viscoelásticos.

### 2.8.1 Fluidos Newtonianos

Un fluido Newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton de la viscosidad, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad o tasa de deformación (ecuación 2.7). Esto es debido a que el término  $\mu$  (viscosidad) es constante para este tipo de fluidos e independiente y del esfuerzo cortante aplicado <sup>[23]</sup>.

Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido Newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos formas de gráficas: (a) la curva del esfuerzo cortante contra la velocidad de deformación ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ), y (b) la curva de viscosidad en función de la velocidad de deformación ( $\mu$  vs  $\dot{\gamma}$ )<sup>[13]</sup> figura 2.2.



**Figura 2.2. Curvas de viscosidad para un fluido Newtoniano a) ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) y b) ( $\mu$  vs  $\dot{\gamma}$ )<sup>[13]</sup>.**

Como se puede observar en la curva a) ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) el valor de la viscosidad  $\mu$  es la tangente del ángulo o pendiente de la línea recta formada por el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. Está pendiente es constante en toda la extensión de la gráfica. Además en la curva b) ( $\mu$  vs  $\dot{\gamma}$ ) se observa que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada<sup>[13]</sup>.

### 2.8.2 Fluido no-Newtoniano

Un fluido no-Newtoniano es aquel cuya viscosidad (resistencia a fluir) varía con la velocidad de deformación o cizallamiento que se le aplica; es decir, se deforma en la dirección de la fuerza aplicada. Como resultado, un fluido no-Newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido Newtoniano. Estrictamente

hablando, la definición de un fluido es válida sólo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no-Newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo (figura 2.3) <sup>[13]</sup>.

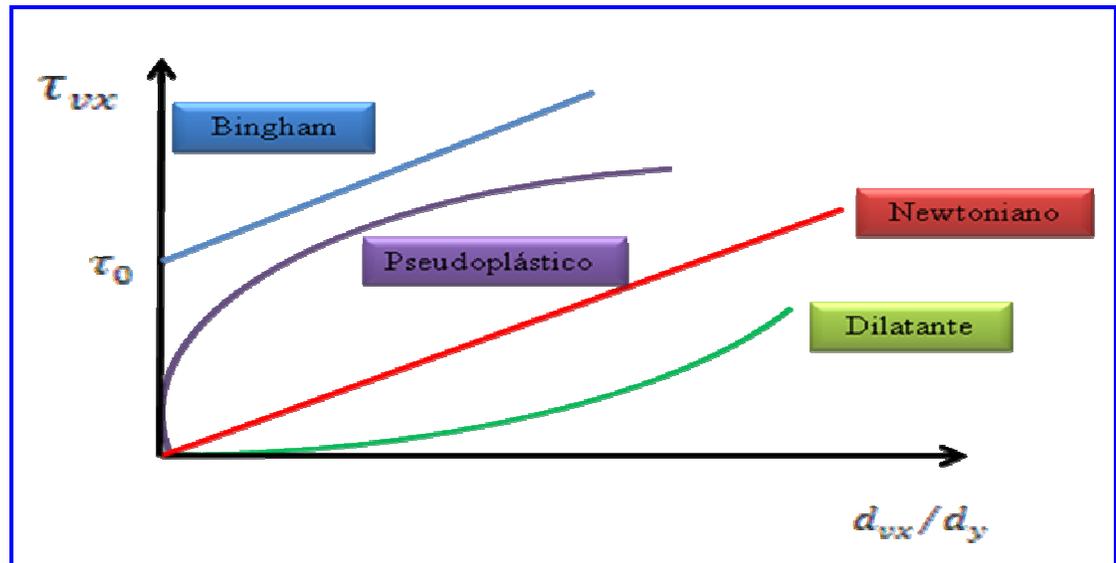


Figura 2.3. Diferentes tipos de fluidos <sup>[13]</sup>.

- Fluidos independientes del tiempo

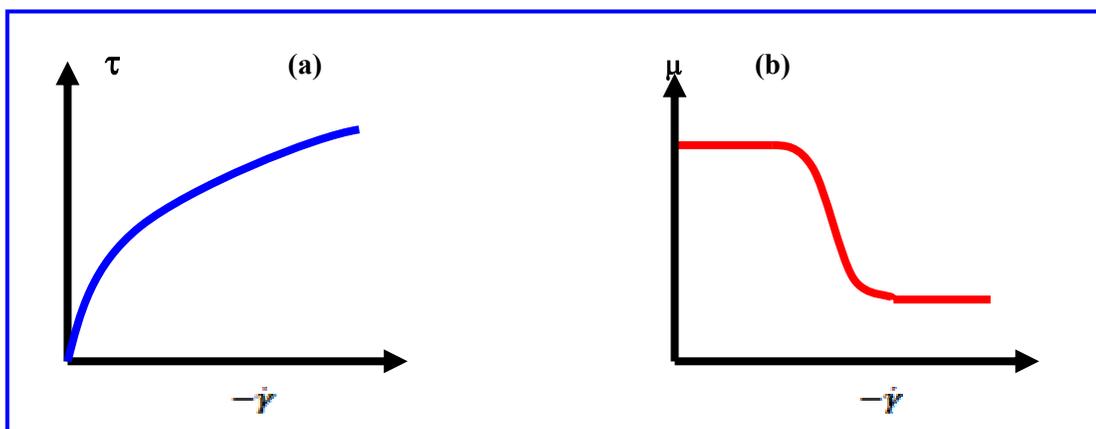
Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

### 2.8.2.1 Fluidos sin esfuerzo umbral o inicial

Este tipo de fluidos se divide a su vez en fluidos pseudoplásticos y fluidos dilatantes. Los fluidos pseudoplásticos se caracterizan por una disminución de su viscosidad aparente con el aumento de la velocidad de deformación.

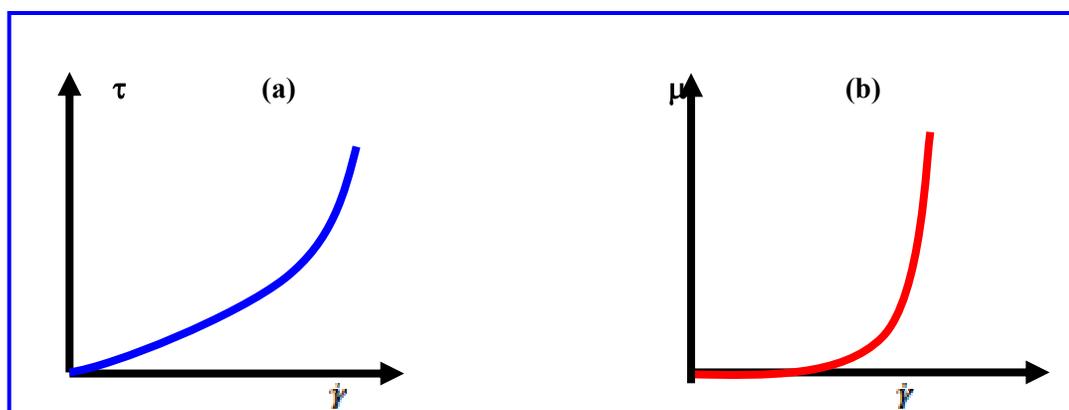
Tanto para las velocidades de deformación bajas como para las altas, los fluidos pseudoplásticos exhiben un comportamiento no-Newtoniano <sup>[26]</sup>.

Para mayores detalles sobre el comportamiento de este fluido, obsérvese la figura 2.4:



**Figura 2.4. Curvas de viscosidad para un fluido pseudoplástico a ( $\tau$  vs  $-\dot{\gamma}$ ) y b) ( $\mu$  vs  $-\dot{\gamma}$ ).**

Por otro lado, para los fluido dilatantes, a diferencia de los pseuplásticos, se produce un aumento en la viscosidad aparente con el aumento de la velocidad de deformación <sup>[25]</sup>. En la figura 2.5 se presentan las curvas de viscosidad aparente para este tipo de fluidos.



**Figura 2.5 Curvas de viscosidad aparente para un fluido dilatante a ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) y b) ( $\mu$  vs  $\dot{\gamma}$ ).**

### 2.8.2.2. Fluidos con esfuerzo umbral o inicial (plásticos)

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral o inicial) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido. La curva del esfuerzo cortante contra la velocidad de deformación ( $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ ) y la curva de viscosidad en función de la velocidad de deformación ( $\mu$  vs  $\dot{\gamma}$ ), para este tipo de fluido se representan en la figura 2.6:

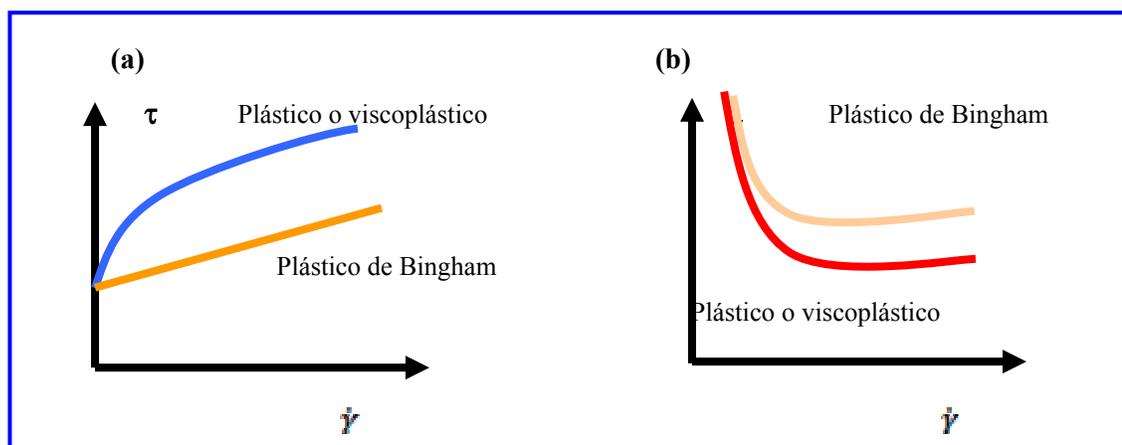


Figura 2.6. Curvas de viscosidad para un fluido plástico.

Los fluidos plásticos, a su vez se dividen: en plásticos de Bingham y fluidos viscoplásticos. Para el caso del plástico de Bingham, luego de superar el esfuerzo de umbral o inicial, la relación entre el esfuerzo de deformación y la velocidad de deformación es lineal. En caso de no existir una relación lineal dicho fluido se denomina plástico o viscoplástico (figura 2.6) <sup>[27]</sup>. Algunos ejemplos de comportamiento plástico son: el chocolate, la arcilla, la mantequilla, la mayonesa, la pasta de dientes, las emulsiones y las espumas.

## 2.9 Reología en fluidos alimentarios

Los alimentos se presentan en una gran variedad de formas, tales como sólidos líquidos y semilíquidos. Algunos alimentos, entre los que se encuentran los helados y las grasas, son sólidos a una temperatura y líquidos a otra. Otros son suspensiones (mermeladas, zumos y purés de frutas, o emulsiones como la leche. Debido a esta amplia variación en su estructura, el comportamiento al flujo de los alimentos fluidos presenta una amplia gama de modelos que van desde el simple Newtoniano a los no-Newtonianos, los dependientes del tiempo y los viscoelásticos. Los numerosos estudios reológicos realizados en alimentos referidos en la bibliografía confirman la gran diversidad de comportamientos al flujo que pueden presentar. Todo ello hace necesario un análisis crítico de los fenómenos aquí señalados y del comportamiento al flujo <sup>[28]</sup>.

El comportamiento reológico de un fluido alimentario puede describirse según distintas ecuaciones que relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación. En la literatura existen muchos modelos para describir este comportamiento; sin embargo, son varios los autores <sup>[29]</sup> que coinciden al afirmar que uno de los modelos más comúnmente usados y de aplicación general, para ajustar los datos experimentales y expresar cuantitativamente el comportamiento al flujo de los fluidos inelásticos independientes del tiempo, es el modelo propuesto por Herschel - Bulkley (ecuación 2.8):

$$\tau = k * \dot{\gamma}^n + \tau_0 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

$\tau$  = es el esfuerzo cortante (N/m<sup>2</sup>)

$\tau_0$  = umbral de fluencia (N/m<sup>2</sup>)

$k$  = índice de consistencia de flujo

$\dot{\gamma}$  = velocidad de deformación (s<sup>-1</sup>)

$n$  = índice de comportamiento al flujo

Dependiendo de los valores que tomen las respectivas constantes esta ecuación 2.7 puede representar, comportamientos newtonianos, plásticos de Bingham, pseuplásticos y dilatantes. En la tabla 2.1 se muestra el comportamiento al flujo.

**Tabla 2.1. Características de los tipos de fluido <sup>[13]</sup>.**

TIPO DE FLUIDO		$k$	$N$	$\tau_0$	ECUACIÓN
Herschel-Bulkley		$>0$	$0 < n < \infty$	$>0$	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n + \tau_0$
Newtoniano		$>0$	1	0	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$
Ley de Potencia	Pseudoplástico	$>0$	$0 < n < 1$	0	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$
	Dilatante	$>0$	$1 < n < \infty$	0	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$
Plástico de Bingham		$>0$	1	$>0$	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} + \tau_0$

## 2.10 Factores que influyen en el comportamiento reológico

Existen muchos factores que influyen en el comportamiento reológico de los alimentos como son la presión, la estructura del alimento, el gradiente de velocidad o velocidad de deformación y el tiempo de tratamiento de la muestra. Pero son quizás, la temperatura de tratamiento y la concentración del alimento los más importantes y los que más se han estudiado.

### 2.10.1 Efecto de la temperatura

Hasta el momento en que son consumidos, los alimentos están sometidos continuamente a cambios de temperatura. Empezando por el proceso de elaboración y pasando por los periodos de transporte y almacenamiento; las condiciones de temperatura a que son sometidos los alimentos pueden variar notablemente. Por este motivo es muy importante conocer sus propiedades reológicas en función de la temperatura.

En sus investigaciones diversos autores correlacionan el efecto que la temperatura ejerce sobre la viscosidad mediante una ecuación de tipo Arrhenius <sup>[30]</sup>. La ecuación como ya se

expresó anteriormente, que correlaciona la viscosidad con la temperatura en su forma linealizada es la ecuación 2.6:

$$\ln k = \ln A + \frac{E_a}{RT} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En fluidos no-Newtonianos se suele emplear el símbolo  $\eta_{ap}$  para la viscosidad aparente en lugar de  $k$ , según Arrhenius quedando como la ecuación 2.9

$$\ln(\eta_{ap}) = \ln(A) + \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

En el caso de fluidos que obedecen el modelo de la Ley de la Potencia y de Herschel-Bulkley, el efecto de la temperatura puede correlacionarse mediante un modelo combinado de la ecuación de Arrhenius para el índice de consistencia <sup>[26]</sup>:

$$\tau = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \dot{\gamma}^n \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Esta ecuación ha sido utilizada en concentrados de tomate <sup>[31]</sup>, cremogenado de pera, puré de guayaba. En líneas generales puede decirse que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, y lo mismo ocurre con el índice de consistencia (K) y el umbral de fluencia ( $\tau_0$ ) <sup>[32]</sup>

## 2.11 Instrumentos de medición de las propiedades reológicas

Los reómetros pueden ser divididos en instrumentos de control de calidad y en instrumentos para investigación y desarrollo. Los instrumentos para control de calidad son aquellos que no poseen una geometría de corte controlada, lo cual quiere decir que la velocidad de corte no está definida. Esto significa que la viscosidad medida no es la viscosidad absoluta <sup>[21]</sup>. La cual no es equivalente a que los instrumentos de control de calidad no son útiles. Son más robustos y simples y adecuados para el control de procesos industriales. Los

instrumentos para investigación y desarrollo poseen una geometría de corte controlada, es decir, que la velocidad de corte puede ser controlada y variada para obtener datos de viscosidad a diferentes velocidades de corte. A continuación se detalla algunos tipos de reómetros:

### 2.11.1 Cilindros concéntricos

Los cilindros concéntricos en reómetros o viscosímetros son una configuración preferida para la evaluación reológica de la suspensión y emulsiones. En la figura 2.7 se muestra un viscosímetro coaxial cilíndrico en el que el líquido se sitúa en el espacio entre el cilindro interior y el exterior. La medida requiere determinar el par de torsión o torque,  $\Omega$ , necesario para girar el cilindro interior a un determinado número de revoluciones por unidad de tiempo [33].

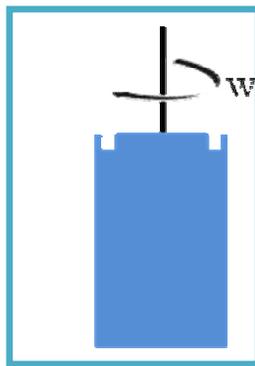


Figura 2.7. Cilindros concéntricos

Para calcular la viscosidad debe conocerse la relación entre el par de torsión,  $\Omega$ , y el esfuerzo cortante,  $\tau$ , así como las revoluciones por segundo,  $N$ , y la velocidad de cizallamiento ( $\dot{\gamma}$ ). La relación entre el par de torsión,  $\Omega$ , y el esfuerzo cortante,  $\sigma$ , será

$$\Omega = 2\pi r^2 L \tau$$

Ecuación 2.11

Donde se tiene en cuenta la longitud  $L$  del cilindro y la distancia  $r$  existente entre los dos cilindros. La velocidad de cizallamiento  $\dot{\gamma}$ , para un sistema rotatorio es función de la velocidad angular,  $\omega$

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación de Herschel-Bulkley (ecuación 2.8) se obtiene

$$\frac{\Omega}{2\pi L r^2} = -\mu \left( r \frac{d\omega}{dr} \right) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Al integrar la ecuación 2.13 entre el cilindro exterior e interior, para conocer la relación con la viscosidad se obtiene la ecuación 2.14

$$\omega_1 = \frac{\Omega}{4\pi\mu L} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Y teniendo en cuenta que

$$\omega_1 = 2\pi R N \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Sustituyendo la ecuación anterior se obtiene

$$\mu = \frac{\Omega}{8\pi^2 N L} \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La ecuación 2.16 muestra cómo la viscosidad de un líquido puede determinarse usando un viscosímetro rotatorio con un cilindro interior de radio  $R_i$ , longitud  $L$ , y un cilindro exterior

$R_0$  mediante medidas del par de torsión  $\Omega$ , originado al girar a un determinado número de revoluciones por segundo  $N$ .

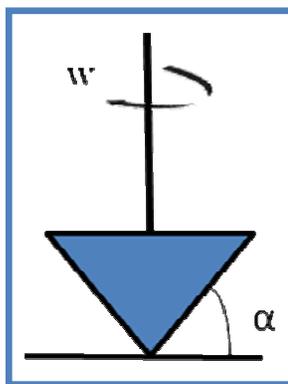
Una variante del viscosímetro coaxial-cilíndrico es el viscosímetro de cilindro simple en el que un único cilindro de radio  $R_i$ , se sumerge en un recipiente con la muestra <sup>[33]</sup>. En este caso, el radio del cilindro exterior  $R_0$  puede considerarse infinito, y la ecuación 2.15 se transforma en:

$$\mu = \frac{\Omega}{8\pi^2 N L R_i^2} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

### 2.11.2 Cono y plato

Su funcionamiento se basa en un líquido situado en el espacio comprendido entre un cono y una placa, siendo muy pequeño el ángulo  $\alpha$  entre ambos ( $\alpha < 4^\circ$ ); para ángulos mayores, los cálculos se complican excesivamente.

En la figura 2.8 se muestra la geometría del sistema de viscosímetro tipo cono y plato. Si el cono gira con cierta velocidad angular ( $\omega$ ), se generará un movimiento de rotación en el fluido de tal forma que éste girará a una velocidad mayor cerca de las paredes del cono.



**Figura 2.8. Cono y placa**

Todos los instrumentos de cono-placa permiten extraer el cono para un cambio de la muestra, lo que facilita en muchos casos la limpieza del mismo, siendo ésta, junto con la pequeña cantidad de muestra necesaria, las principales ventajas que presenta este tipo de equipos. En la mayoría de los viscosímetros rotacionales la velocidad de cizalla cambia con la distancia al centro de rotación. Sin embargo, en el viscosímetro de cono-placa esta velocidad de cizallamiento a lo largo del espaciado del cono es constante, ya que el espaciado entre el cono y el plato aumenta al incrementar la distancia al centro. Para fluidos no-Newtonianos no es necesario llevar a cabo correcciones, siendo posible aplicar las ecuaciones para fluidos Newtonianos <sup>[23]</sup>:

$$\tau = \frac{3\Omega}{2\pi R_c^3} \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\alpha} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

donde:

$\tau$  = esfuerzo de deformación o esfuerzo de cizallamiento (N/m<sup>2</sup> o Pa)

$\dot{\gamma}$  = velocidad de deformación o velocidad de cizallamiento (s<sup>-1</sup>)

$R_c$  = radio del cono (m)

$\Omega$  = torque (N.m)

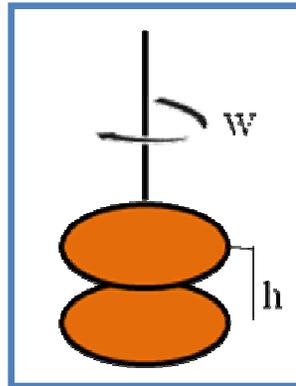
$\omega$  = velocidad angular del cono (s<sup>-1</sup>)

$\alpha$  = ángulo del cono

### 2.11.3 Platos paralelos

En el caso de un viscosímetro de platos paralelos el fluido se encuentra entre éstos, el plato gira mientras que el inferior permanece inmóvil. Los elementos de fluido cercanos a la placa móvil tendrán una velocidad superior a la que tienen los que se encuentran próximos a la placa fija. Así pues, el cizallamiento se produce desde el plato de abajo hacia el de arriba <sup>[34]</sup>. Al igual que en los viscosímetros de cono-placa, este tipo de instrumentos son fáciles de limpiar y requieren pequeñas cantidades de muestra. La capacidad de fijar un espesor de

muestra, de acuerdo a las características, ésta es una ventaja en suspensiones de partículas de gran tamaño, o en líquidos que tienden a ser expulsados fuera de las placas. Sin embargo, la viscosidad de la muestra es difícil de evaluar ya que la velocidad de cizallamiento cambia de acuerdo a la distancia al centro de la placa <sup>[34]</sup>.



**Figura 2.9. Platos paralelos**

En un viscosímetro de placas paralelas, se pueden calcular la velocidad de cizallamiento o deformación máxima y la viscosidad, mediante las siguientes ecuaciones <sup>[34]</sup>:

$$\dot{\gamma}_m = \frac{\omega}{l} R \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$\eta = \frac{3\Omega}{2\pi R^3(\dot{\gamma}_m)} \left[ 1 + 3 \frac{d \ln \Omega}{d \ln(\dot{\gamma})} \right] \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde:

$\dot{\gamma}$  = velocidad de deformación o velocidad de cizalla ( $s^{-1}$ )

R = radio del plato (m)

l = distancia entre placas (m)

$\Omega$  = torque o fuerza aplicada

$\omega$  = velocidad de giro ( $s^{-1}$ )

$\eta$  = viscosidad aparente

### 2.11.4 Reómetro o viscosímetro del tubo

El reómetro o viscosímetro capilar es una de las herramientas más simples y exactas para medir viscosidad. También es la geometría más adecuada cuando es necesario para simular un proceso con la participación de bombeo, drenaje, o de extrusión figura 2.10 [34].

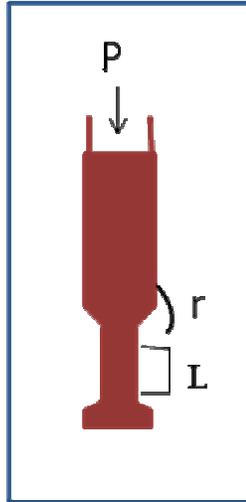


Figura 2.10. Viscosímetro capilar

La presión ( $\Delta P$ ) es suficiente para vencer las fuerzas de cizalla o corte dentro del líquido y produce un flujo a una velocidad determinada. Las fuerzas de corte operan en la superficie interna del líquido a lo largo de toda la longitud  $L$  del tubo y a una distancia  $r$  del centro de éste tubo. La fuerza de cizalla es fuerza por unidad de área, donde el área es la sección circular [33], entonces

$$\sigma = \frac{F}{2\pi rL} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Y la presión ( $\Delta P$ ) es fuerza por unidad de área, donde el área corresponde a la sección transversal. Entonces,

$$\Delta P = \frac{F}{\pi r^2} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Sustituyendo la ecuación 2.23 en la ecuación 2.22 se tiene lo siguiente:

$$\sigma = \frac{\Delta P r}{2L} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Utilizando la ecuación que define el perfil de velocidad

$$\mu = \frac{\Delta P}{4\mu L} (R^2 - r^2) \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Desarrollando e integrando se obtiene finalmente la ecuación base del diseño y operación de cualquier viscosímetro de tubo capilar. Para un tubo de longitud  $L$  y radio  $R$ , la medida de un caudal  $\dot{V}$  a una presión  $\Delta P$  permitirá determinar la viscosidad  $\mu$ .

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\mu L} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

Finalmente se obtiene la siguiente ecuación basada en las características propias de un fluido Newtoniano, cualquier combinación caudal caída de presión dará el mismo valor de viscosidad.

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8L \dot{V}} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **3.1. Comparación de metodologías de análisis de viscosidad (viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield) en jugos y néctar de frutas**

Para efectos de la comparación entre los métodos viscosimétricos Copa Ford y Brookfield, en primer lugar se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

##### **3.1.1. Medición con la Copa Ford**

Éste es el instrumento de medición de viscosidad cinemática comúnmente utilizado en las plantas productoras de néctares para el control de calidad, fabricadas con materiales resistentes a la corrosión y a los solventes <sup>[35]</sup>. En la figura 3.1.a, se presenta un aspecto de la Copa Ford; y en las figuras 3.1.b los detalles básicos de diseño y dimensiones de las copas Ford N° 2 y N° 4. Su uso consiste en la medición del tiempo que tarda una muestra de 100 ml en ser desalojada de una copa cilíndrica y de fondo cónico.

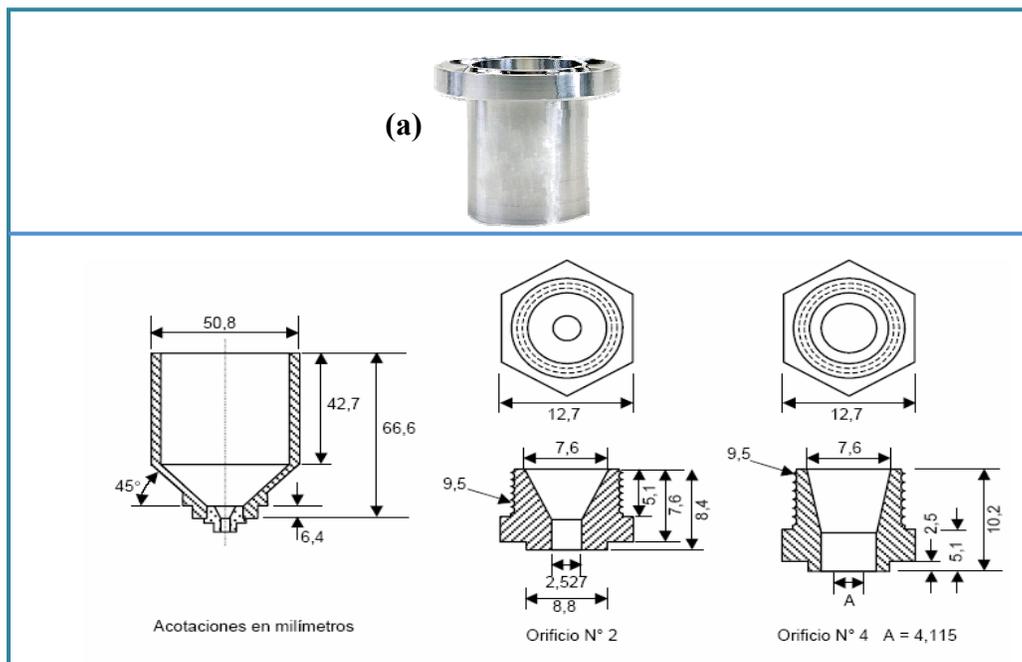


Figura 3.1.a) Vista de Copa Ford, b) Dimensiones de las Copas Ford N° 2 y N°4 <sup>[35]</sup>

Para convertir los valores del tiempo de descarga obtenidos a partir de las mediciones realizadas con las copas Ford N° 2 y N° 4, a unidades de viscosidad cinemática (centiStoke), se utilizó una tabla de conversión que viene incorporada con el equipo (tabla 3.1):

Tabla 3.1. Ecuaciones para la conversión del tiempo (segundos) viscosidad cinemática (centiStokes) <sup>[36]</sup>.

N° de la Copa Ford	Ecuaciones
1	$\nu = 0,49(t-35,0)$
2	$\nu = 1,44(t-18,0)$
3	$\nu = 2,31(t-6,58)$
4	$\nu = 3,85(t-4,49)$
5	$\nu = 12,1(t-2,00)$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática y t el tiempo en segundos.

Igualmente se determinó la densidad de los néctares, haciendo uso de un densitómetro Anton Parr (figura 3.2). Su uso consiste en colocar la muestra en unos cilindros que vienen con el equipo. La muestra es succionada y atemperada a la temperatura deseada, y de manera automática muestra el valor de la densidad.



**Figura 3.2. Densitómetro Anton Parr**

### **3.1.2. Medición con el viscosímetro de Brookfield**

El viscosímetro de Brookfield es un equipo que mide la viscosidad aparente de un fluido a una velocidad de corte o de deformación dada, ya que ésta puede ser variada. Por lo tanto, con el análisis de los datos obtenidos con este equipo se puede determinar el tipo o naturaleza de fluido, ya sea Newtoniano o no-Newtoniano, a través de un reograma (figura 2.2, por ejemplo).

En la figura 3.3 se puede observar el viscosímetro de Brookfield modelo RV, utilizado en la realización de las mediciones. Se utilizó un *beaker* de 600 ml como contenedor de la muestra y se procedió a seleccionar el cilindro rotatorio (o aguja) y la velocidad de deformación a la cual se trabajó, dependiendo de la viscosidad de la muestra.



**Figura 3.3. Viscosímetro de Brookfield (a) y sus respectivas agujas (b).**

### **3.1.3. Criterios de comparación entre viscosimetrías Copa Ford y Brookfield**

En el caso de los jugos y néctares fueron seleccionados varios criterios de comparación para el análisis de viscosidad entre las viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield, los cuales se señalan a continuación:

- Tipo de viscosidad medida.
- Participación del operador.
- Independencia de uso.
- Grado de dificultad.
- Nivel de precisión.

Todos los criterios resumen los aspectos de mayor relevancia y pertinencia de estos métodos para las determinaciones de viscosidad de este tipo de productos.

#### **3.1.4. Comparación entre resultados con Copas Ford N° 2 y N° 4**

Como parte de los análisis de resultados de las viscosidades dinámicas de los jugos y néctares de frutas, se efectuaron comparaciones entre los valores de viscosidades resultantes medidas en las copas Ford N° 2 y N° 4. Ello fue motivado por la necesidad de seleccionar el número de Copa Ford más apropiado para los jugos y néctares de frutas usualmente elaborados en la planta.

Cabe acotar que por razones de confidencialidad de la empresa no se puede revelar los nombres de las frutas utilizadas en el estudio, aclarando que se estudiaron cinco sabores diferentes dentro de los cuales se encuentra un jugo y el resto son néctares, tomando como abreviatura las letras A, B, C, D y E. El jugo es el producto identificado con la letra A y los restantes corresponden a néctares. Las pulpas estudiadas corresponden a los mismos sabores del jugo y los néctares, clasificadas similarmente con las letras A, B, C, D y E.

#### **3.1.5 Cálculo de la viscosidad dinámica**

Para calcular la viscosidad dinámica se midió el tiempo de descarga (s) que tarda el fluido en desalojar la Copa Ford. Por ejemplo, para la muestra de los cálculos correspondientes al néctar de D, el tiempo de descarga resultaron 26,87 s a 20 °C. Para convertir este tiempo a viscosidad cinemática (cSt) se utilizó la ecuación requerida según la Copa Ford empleada (en este caso la N° 2). Cuando se emplean copas Ford diferentes se aplica la ecuación según sea el caso (tabla 3.1).

Sustituyendo el tiempo de descarga en la ecuación de la copa utilizada se obtiene lo siguiente:

$$v = 1,44*(26,87 - 18,0)$$
$$v = 12,7728 \text{ cSt}$$

Una vez obtenida la viscosidad cinemática (cSt), ésta se multiplica por la densidad de la muestra determinada experimentalmente en el densitómetro Anton Parr ( $1,0549 \text{ kg/m}^3$ ) haciendo uso de la ecuación 2.4, para calcular la viscosidad dinámica en (cP):

$$\mu = 12,7728 \text{ cSt} * 1,0549 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 13,474 \text{ cP}$$

El mismo procedimiento se realiza para los demás jugos y néctares, para obtener la viscosidad dinámica cuando se usan las copas Ford (anexo A.1).

Entonces, para convertir viscosidad cinemática en cSt a viscosidad dinámica en cP, sólo hay que multiplicar los cSt por la densidad en  $\text{kg/m}^3$ , sin otro factor de conversión adicional (conversión directa).

### **3.2. Caracterización de las propiedades reológicas de las pulpas de frutas empleadas en la elaboración de jugos y néctares**

Para llevar a cabo la caracterización de las propiedades reológicas de las pulpas de frutas es necesario conocer la conversión que se le aplica a las lecturas obtenidas con el viscosímetro de Brookfield.

#### **3.2.1 Conversión de lecturas a función de viscosidad en el viscosímetro de Brookfield, modelo RVT**

Cada aguja tiene características específicas de diámetro y longitud, según sea el número de ella. Para el caso del viscosímetro de Brookfield, modelo RVT, se dispone de un procedimiento creado por Mitscha<sup>[37]</sup>, bajo condiciones de flujos reptantes o muy viscosos, y mediante el cual se logra convertir las lecturas de % de deflexión y velocidad de rotación de la aguja, a funciones de viscosidad (esfuerzo cortante y tasa de deformación, respectivamente) a través de factores de conversión específicos para cada aguja (tabla 3.2).

Antes de realizar las mediciones se selecciona la aguja, dependiendo de la viscosidad de la muestra y mediante lecturas en el viscosímetro se obtiene: el porcentaje de deflexión en el dial del torque (%  $\alpha$ ), la velocidad de rotación de la aguja (N) en rpm; y la viscosidad aparente ( $\eta$ ) en cP. Para transformar estas mediciones a valores de torque en Pascal (Pa) y velocidad de deformación en ( $s^{-1}$ ), se realiza el siguiente procedimiento:

Se convierte el porcentaje de deflexión en el dial del torque (%  $\alpha$ ) a esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en Pascal (Pa), utilizando la ecuación 3.1:

$$\tau_i = k_{\alpha\tau} * \alpha_i \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Siendo  $k_{\alpha\tau}$  un factor de conversión específico por aguja, el cual se obtiene de la tabla 3.2, luego se grafica ( $\log \tau_i$  (Pa) vs.  $\log N_i$  (rpm)); y si resulta una línea recta, su pendiente única es equivalente al índice aparente de comportamiento de flujo ( $n_{ap}$ ), y el fluido es del tipo ley de la potencia. Este índice es aparente o preliminar ( $n_{ap}$ ), porque sólo está basado en datos de  $\tau$  y  $N$ ; y el índice verdadero de comportamiento al flujo ( $n$ ) es aquel que resulta del cálculo sustentado en la gráfica con datos de  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$ .

Ahora bien, para convertir las lecturas de velocidad de rotación de la aguja ( $N_i$ , rpm) a velocidades o tasas de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), se procede mediante la ecuación 3.2:

$$\dot{\gamma} = K_{N\dot{\gamma}} (n_{ap}) N_i \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Si la gráfica  $\log \tau_i$  (Pa) vs.  $\log N_i$  (rpm) no resulta una línea recta, el índice aparente de comportamiento al flujo será  $n_i^* = n_i^*(N_i)$ , y se determina por la ecuación 3.3:

$$n_i^* = d(\log \tau) / d(\log N) |_{N=N_i} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

En este caso la velocidad de deformación se calcula por la ecuación 3.4:

$$\dot{\gamma}_i = k_{NY} (n_i^*) * N_i \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde  $k_{NY}$  es el factor de conversión de las lecturas de velocidades de rotación de la aguja ( $N_i$ ) a tasas de deformación ( $\dot{\gamma}_i$ ); el cual varía según el número de la aguja y el índice aparente de comportamiento al flujo ( $n_{ap}$ ). Para obtener valores de  $k_{NY}$  se dispone de los datos correspondientes en función del número de aguja y  $n_{ap}$  en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Factores de conversión para las agujas en un viscosímetro de Brookfield, modelo RVT**

N° DE LA AGUJA	1	2	3	4	5	6	7
<b>K<math>\alpha</math><math>\tau</math></b>	0,035	0,019	0,279	0,539	1,05	2,35	8,4
<b>n<sub>ap</sub></b>	<b><math>k_{NY}</math></b>						
0,1	1,728	1,431	1,457	1,492	1,544	1,366	1,936
0,2	0,967	0,875	0,882	0,892	0,907	0,851	1,007
0,3	0,705	0,656	0,656	0,658	0,663	0,629	0,681
0,4	0,576	0,535	0,53	0,529	0,528	0,503	0,515
0,5	0,499	0,458	0,449	0,445	0,442	0,421	0,413
0,6	0,449	0,404	0,392	0,387	0,382	0,363	0,346
0,7	0,414	0,365	0,35	0,343	0,338	0,32	0,297
0,8	0,387	0,334	0,317	0,31	0,304	0,286	0,261
0,9	0,367	0,31	0,291	0,283	0,276	0,26	0,232
1	0,351	0,291	0,27	0,262	0,254	0,238	0,209

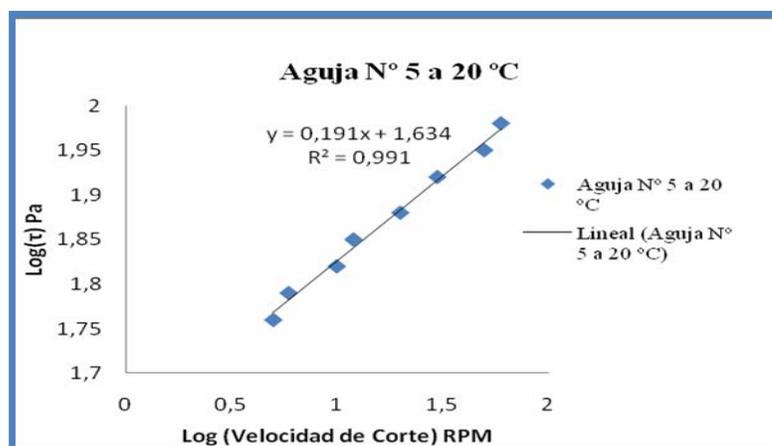
### 3.2.2 Cálculos de las propiedades reológicas de las pulpas

Para caracterizar las propiedades reológicas de las pulpas se realizaron las mediciones en las diferentes pulpas de frutas a 20 °C con el viscosímetro rotacional Brookfield, al obtener los valores de porcentaje de deflexión en el dial del torque (%  $\alpha$ ), la velocidad de rotación de la aguja (N) en rpm y la viscosidad aparente ( $\eta_{ap}$ ). Se procedió a transformar dichos valores; por ejemplo, para la pulpa de D a 20 °C con la aguja N° 5 a 60 RPM, se obtuvo una deflexión de 91,6 % (tabla B.1) y el valor de  $K\alpha\tau$  1,05 para la aguja N° 5 (tabla 3.2). Al aplicar la ecuación 3.1 se obtiene lo siguiente:

$$\tau_i = 91,6 * 1,05$$

$$\tau_i = 96,18 \text{ Pa}$$

Este resultado está tabulado en la tabla B.1. Luego se graficó ( $\log \tau_i$  (Pa) vs.  $\log N_i$  (rpm)) y se obtuvo como valor del índice aparente de comportamiento de flujo ( $n$ ), la pendiente de dicha gráfica (figura 3.4).



**Figura 3.4. Gráfica de conversión de variables a funciones de viscosidad para la pulpa de D a 20 °C.**

De la gráfica precedente se determinó  $n_{ap} = 0,191$  (tabla C.3), el cual representa un valor preliminar o aparente. Para la aguja N° 5, mediante interpolación (tabla 3.2), se calculó el valor de  $k_N \dot{\gamma}$  (0,9376). Entonces, usando la ecuación 3.2 se calculó la velocidad de deformación:

$$\dot{\gamma} = 60 * 0,9376$$

$$\dot{\gamma} = 53,26 \text{ s}^{-1}$$

Estos resultados se reportaron en la tabla B.1.

Una vez calculados la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) en unidades de  $\text{s}^{-1}$  y el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en Pa, se elaboró un reograma presentando  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$  (figura 3.4) y con la ayuda del programa Excel se estimó el valor del esfuerzo de corte inicial o cedente ( $\tau_0$ ), a partir de una ecuación de regresión resultante. Es decir, el término independiente es numéricamente igual al esfuerzo cedente ( $\tau_0$ ).

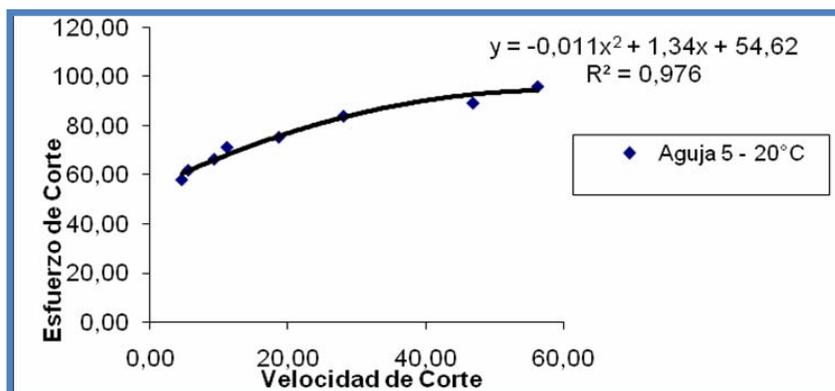


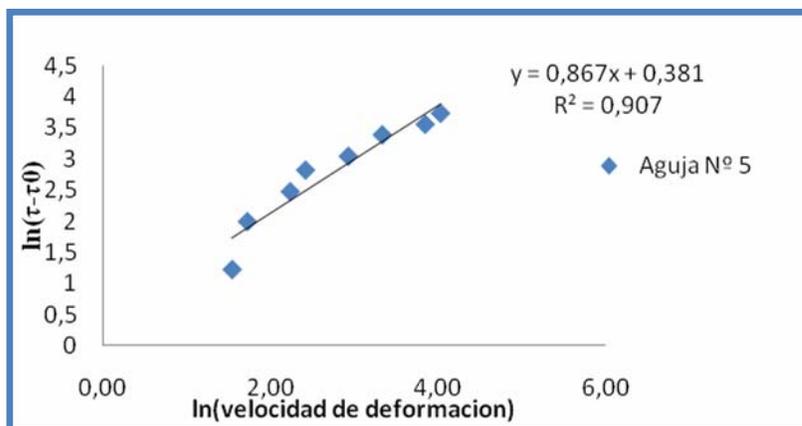
Figura 3.4. Esfuerzo de corte vs. velocidad de deformación para pulpa de D a 20 °C.

Conocido el valor de  $\tau_0$  y convirtiendo la ecuación de Herschel-Bukley (2.7) a una ecuación lineal, se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln(\tau - \tau_0) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma}) \quad \text{Ecuación}$$

3.5

La cual se grafica en la forma ( $\ln(\tau - \tau_0)$  vs  $\ln(\dot{\gamma})$ ), mostrada en la figura 3.5.



**Figura 3.5. Representación gráfica del modelo de Herschel Bukley para la pulpa de D a 20 °C.**

De la gráfica de la figura 3.5 se obtienen el índice de consistencia ( $k$ ) y el índice verdadero de comportamiento al flujo ( $n$ ). Como la regresión reveló un comportamiento lineal (con  $R^2=0,907$ ) entre las variables representadas en los ejes de coordenadas, de acuerdo a la ecuación (3.5), la pendiente de la línea recta es el índice verdadero de comportamiento al flujo ( $n$ ), y el intercepto en el origen representa el índice de consistencia ( $k$ ). Finalmente,

$$n = 0,867$$

$$k = \exp(0,381)$$

$$k = 1,463$$

### **3.3. Evaluación del efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de las pulpas, jugos y néctares de frutas**

Para llevar a cabo el desarrollo de este objetivo se analizó el efecto de la temperatura sobre la viscosidad en los casos de jugos y néctares; y para el caso de las pulpas de frutas el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia ( $k$ ) y el índice de cedencia.

#### **3.3.1. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los jugos y néctares de frutas**

Para la evaluación de la temperatura sobre la viscosidad de los jugos y néctares, se siguió el procedimiento descrito en el ítem 3.1.6, para obtener la viscosidad dinámica ( $\mu$  en Pa.s) a diferentes temperaturas (tabla 3.3), en la Copa Ford N° 2. Luego, haciendo uso de la ecuación 2.5 y sabiendo que  $k$  (en este caso la viscosidad dinámica) es un término dependiente de la temperatura, se procede a graficar  $\ln(\mu)$  vs.  $1/T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$$\ln \mu = \ln A + \frac{E_a}{RT}$$

Ecuación 3.6

**Tabla 3.3. Diseño experimental para determinación de viscosidad de jugos y néctares de frutas**

FACTOR	NIVELES					N° DE REPETICIONES
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	10	15	20	25	30	3
Instrumento	Copa Ford N° 2					

Una vez construida la gráfica se obtiene lo siguiente:

$$m = E_a/R$$

$$y = \ln(\mu)$$

$$b = -\ln(A)$$

Para obtener el valor de la energía de activación se debe multiplicar la pendiente obtenida  $m$ , por la constante universal de los gases ( $R = 8,314 \text{ J/mol}^{\circ}\text{K}$ ).

### 3.3.1. Efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia de las pulpas de frutas

En el caso de pulpas de frutas se debe aplicar el procedimiento de cálculo del ítem 3.2.2, hasta obtener el índice de consistencia ( $k$ ), a las temperaturas y velocidades de deformación mostradas en la tabla 3.3. Y luego aplicar el procedimiento anterior para evaluar el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia, sustituyendo el valor de  $\mu$  de la ecuación 3.6 por el valor del índice de consistencia ( $k$ ) se obtiene la ecuación 3.7:

$$\ln k = \ln A' + \frac{Ea'}{RT}$$

Ecuación 3.7

**Tabla 3.4. Diseño experimental para determinación de propiedades reológicas de pulpas de frutas**

FACTOR	NIVELES									Nº DE REPETICIONES
Temperatura (°C)	0	5	10	15	20	25				3
N(rpm)	5	6	10	20	20	30	50	60	100	

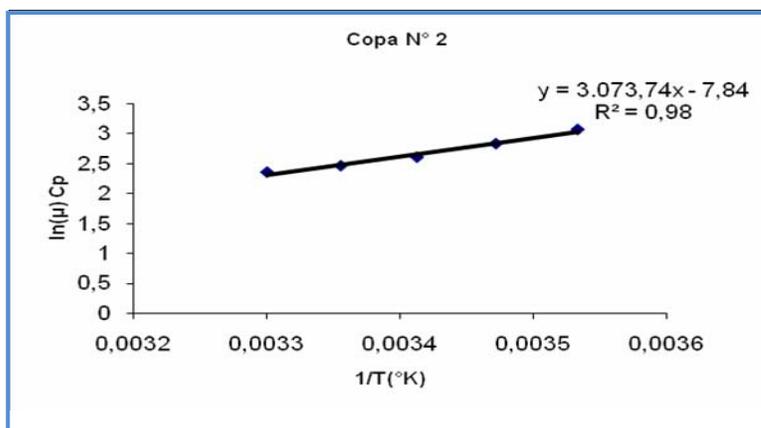
### 3.3.2. Muestra de cálculos

Una vez determinada la viscosidad en el caso de los jugos y néctares, y el índice de consistencia y esfuerzo de cedencia en el caso de las pulpas se procedió a evaluar el efecto que tiene la temperatura sobre dichas propiedades según el caso. Por ejemplo, en el ítem 3.1.5 se determinó la viscosidad dinámica del néctar de D a 20 °C; de manera similar se determinó las viscosidades a las diferentes temperaturas, obteniéndose lo siguiente:

**Tabla 3.5. Viscosidades dinámicas para el néctar de D a diferentes temperaturas**

Temperatura (°C)	$\mu$ (Cp)
10	21,3712
15	16,8769
20	13,4785
25	11,6959
30	10,506

Luego se gráfica  $\ln(\mu)$  vs.  $1/T$  (°K), obteniéndose la siguiente gráfica.



**Figura 3.6. Representación gráfica de la ecuación de Arrhenius para el néctar de D.**

De la gráfica anterior se obtuvo lo siguiente:

$$m = E_a/R = 3073,74.$$

Multiplicando este valor por la constante universal de los gases ( $R = 8,314 \text{ J/mol}^{\circ}K$ ) resulta:

$$E_a = 25,555 \text{ (KJ/mol)}$$

De igual manera se obtuvo  $b = \ln(A) = -7,8$ , resultando:

$$A = -4,10E-04.$$

## CAPÍTULO IV

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Comparación de las diferentes metodologías de análisis de viscosidad (viscosimetrías Copa Ford y de Brookfield) utilizadas en la industria para jugos y néctares de frutas

En esta etapa se compara la metodología del viscosímetro de Brookfield con la de las Copas Ford; igualmente se contrastan los resultados obtenidos con la Copa Ford N° 2 con los de la Copa Ford N° 4, para poder decidir cuál de las metodologías aplicadas es la más recomendable para la medición de viscosidad de los diferentes jugos y néctares. A continuación se presenta la comparación cualitativa entre los métodos Copa Ford y del viscosímetro de Brookfield (tabla 4.1).

**Tabla 4.1. Comparación entre las metodologías Brookfield y Copa Ford.**

<b>CRITERIOS DE COMPARACIÓN</b>	<b>VISCOSIMETRÍA COPA FORD</b>	<b>VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD</b>
<b>Naturaleza del fluido</b>	Recomendable para fluidos Newtonianos.	Se puede determinar el tipo de fluido, ya sea Newtoniano o no-Newtoniano.
<b>Tipo de viscosidad medida</b>	Se obtiene primeramente viscosidad cinemática y luego la viscosidad dinámica.	Se obtienen valores de viscosidad dinámica y aparente.
<b>Participación del operador</b>	El operador tiene una participación directa en las mediciones, ya que el mismo tiene que medir el tiempo de descarga del fluido.	El operador tiene una participación indirecta en los resultados, pues el viscosímetro suministra el valor de viscosidad directamente.
<b>Independencia de uso</b>	Se mide el tiempo de descarga del fluido, pero también se debe medir la densidad de éste con otro instrumento.	Trabaja a diferentes velocidades de corte y mediante lecturas de momentos de torsión en el mismo instrumento.
<b>Grado de dificultad</b>	En general son	Son un poco más

	sencillos y fáciles de manejar.	complicados a la hora de manejarlos y se necesita de mayor tiempo.
<b>Nivel de precisión</b>	Depende del operador, ya que éste es quien activa el cronómetro.	La precisión varía conforme a la velocidad del viscosímetro y con el grado de viscosidad de la muestra.

En base a lo señalado anteriormente sobre la comparación de las metodologías Copa Ford y Brookfield, se concluye que dependiendo del grado de viscosidad del fluido, se puede seleccionar uno de estos dos instrumentos para mediciones de viscosidad. Por su parte, el viscosímetro de Brookfield arroja resultados de viscosidad dinámica; sólo requiere de datos y mediciones correspondientes a este mismo instrumento.

Mientras que la viscosimetría Copas Ford requiere la determinación de la densidad del fluido con otro instrumento, para convertir viscosidad cinemática a viscosidad dinámica. Se presenta esta comparación porque con el viscosímetro de Brookfield sólo se realizan mediciones para fluidos muy viscosos <sup>[37]</sup>.

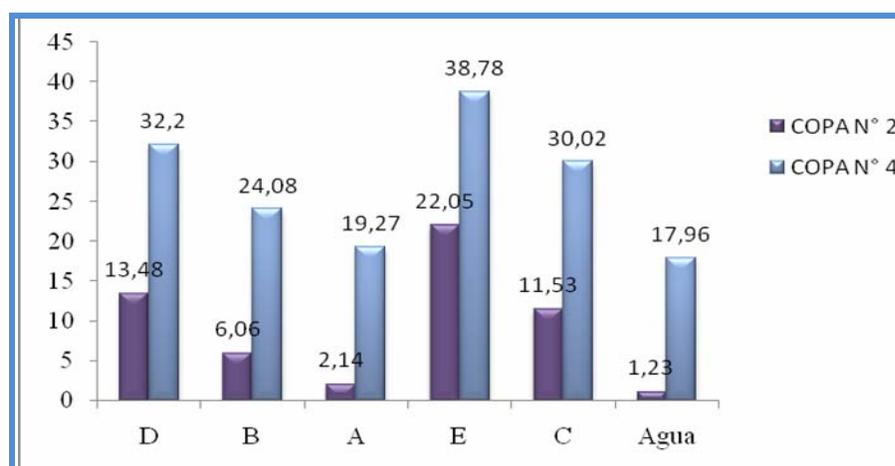
#### 4.1.1 Copas Ford N° 2 y N° 4

En la tabla 4.2 se muestran los resultados de los cálculos realizados para comparar los valores de viscosidades dinámicas a partir de las viscosidades cinemáticas y densidades (tabla A.1 e A.2) para los diferentes néctares, haciendo uso de las copas Ford N° 2 y N° 4 a temperatura de 20 °C.

**Tabla 4.2. Valores de viscosidad dinámica para jugos y néctares a 20 °C con las copas Ford N° 2 y N° 4.**

MUESTRA	° BRIX	COPA N° 2	COPA N° 4
		VISCOSIDAD (cP)	VISCOSIDAD (cP)
D	13,48	13,48	32,20
B	11,26	6,06	24,08
A	13,37	2,14	19,27
E	11,58	22,05	38,78
C	13,52	11,53	30,02
Agua	0	1,23	17,96

En la figura 4.1, se presenta gráficamente los resultados mostrados en la tabla 4.2 con las copas Ford N° 2 y N° 4.



**Figura 4.1. Comparación de viscosidades dinámicas para néctares y jugos medidas a 20 °C.**

Como se puede observar, los jugos y néctares arrojaron viscosidades mayores con la copa N° 4 que con la copa N° 2. Sin embargo, se realizaron las mismas mediciones para el agua a la misma temperatura de 20 °C, como resultado se obtuvo que para la Copa Ford N° 4 la viscosidad del agua fue de 17,96 cP, valor que excedió la viscosidad del agua (1,005 cP a 20 °C), tabulado en la literatura <sup>1381</sup>. Sin embargo, el resultado con la Copa Ford N° 2 arrojó un valor de 1,23 cP para la viscosidad del agua a 20 °C (fluido Newtoniano), lo que implica que la Copa Ford N° 2 es más confiable en este tipo de fluidos. Se concluye entonces, que los

resultados de viscosidad obtenidos con la Copa Ford N° 2 son más exactos y confiables para el agua (fluido Newtoniano).

#### **4.2 Caracterización de los parámetros reológicos de las diferentes pulpas de frutas empleadas en la elaboración industrial de jugos y néctares**

En esta etapa del estudio se determinaron las propiedades reológicas (índice de consistencia ( $k$ ) y del índice de comportamiento de flujo ( $n$ )) a las diferentes pulpas de frutas mediante regresión aplicada a los datos de viscosidad aparente y de tasa de deformación, a la forma linealizada del modelo de Herschel-Bulkley y a la temperatura de 20 °C. Los parámetros reológicos mencionados, como también los valores de los esfuerzos cedentes ( $\tau_0$ ) resultantes, en función de los grados Brix se presentan en la tabla 4.2. También se muestran los coeficientes de correlación  $R^2$  (0,9170 a 0,9847) de las regresiones lineales para  $k$  y  $n$ ; así mismo los valores  $R^2$  (de 0,9693 y 0,9972) para las regresiones de los modelos polinómicos que dieron como resultado los esfuerzos cedentes ( $\tau_0$ ) para cada pulpa de fruta estudiada a 20 °C. En consecuencia, la calidad de las regresiones realizadas evidenciaron dispersiones insignificantes de los datos experimentales; es decir que los resultados fueron altamente confiables en todos los casos estudiados.

Por otra parte, se observa que para las pulpas de las frutas B, D y E con contenidos de sólidos entre 30,27 y 31,58 °Brix, sus índices de comportamiento de flujo ( $n$ ) fluctuaron levemente entre 0,796 y 0,816 respectivamente. Mientras la pulpa A, mucho más concentrada en sólidos (64,39 °Brix) demostró poseer el mayor índice de consistencia (0,924); y la pulpa C, la más diluida de todas (16,58 °Brix), tuvo el índice de comportamiento de flujo sólo levemente superior (0,846) a los mostrados por el primer grupo de pulpas (B, D y E).

**Tabla 4.3. Valores de los parámetros reológicos de las diferentes pulpas a 20 °C.**

<b>PULPA</b>	<b>° BRIX</b>	<b>N</b>	<b>k (cP)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>τ<sub>0</sub> (Pa)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
B	30,27	0,796	3,038	0,9170	172,00	0,9693
D	31,15	0,867	1,714	0,9377	52,17	0,9951
E	31,58	0,816	3,887	0,9581	151,90	0,9709
C	16,58	0,846	0,407	0,9613	12,00	0,9939
A	64,39	0,924	1,058	0,9847	4,39	0,9972

Adicionalmente se puede apreciar que existen diferencias entre los índices de consistencia de cada pulpa, ya que cada una cuenta con características propias y, por ende, tienen variaciones en los parámetros reológicos. Ordenando de forma decreciente según sus índices de consistencia, se puede decir que la pulpa de E exhibió el mayor valor de este índice (3,887 cP) entre todas las pulpas, seguida de la pulpa B (3,038 cP) y de la pulpa D (1,714 cP). Por otra parte, las pulpas de A y C resultaron ser las de menor índices de consistencia (1,058 cP y 0,407 cP, respectivamente). Análogamente fueron determinados los valores de esfuerzos de cedencia para las pulpas. La pulpa de B arrojó el mayor valor de esfuerzo cedente (172,00 Pa), seguido de las pulpas de D y E con 151 Pa y 52,17 Pa, respectivamente. Y con los más bajos índices de cedencia resultaron la pulpa de C (12,00 Pa) y la de A con 4,39 Pa.

Estos resultados revelaron que el comportamiento reológico de las pulpas estudiadas correspondió a pulpas tipo plástico de Bingham. Particularmente es notorio el caso de las pulpas B y E, en las cuales los esfuerzos cedentes e índices de consistencia más altos, son congruentes con la presencia de compuestos orgánicos constituidos de estructuras más complejas en tamaños y masas moleculares, con cadenas tanto lineales como ramificadas. Éstas usualmente forman una trama intrincada que impide su fluidez, y por lo tanto requieren de la aplicación de fuerzas o esfuerzos mucho mayores, para iniciar su desplazamiento y comenzar a fluir, aunque a niveles diferentes.

### 4.3 Evaluación del efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos de los jugos, néctares y pulpas de frutas

La influencia de la variación de la temperatura entre 10 y 30 ° C, sobre las viscosidades de los jugos y néctares medidas con la Copa Ford N° 2, se muestra primeramente en la gráfica de la figura 4.2 (tabla 4.4); como también aplicando la ecuación de Arrhenius (figura 4.3 y tabla 4.5). Posteriormente, se presenta el efecto de la temperatura entre 0 y 25 °C sobre los índices de consistencia (k) y los esfuerzos cedentes ( $\tau_0$ ) de las pulpas a través del modelo de Arrhenius (figuras 4.4 y 4.5, respectivamente).

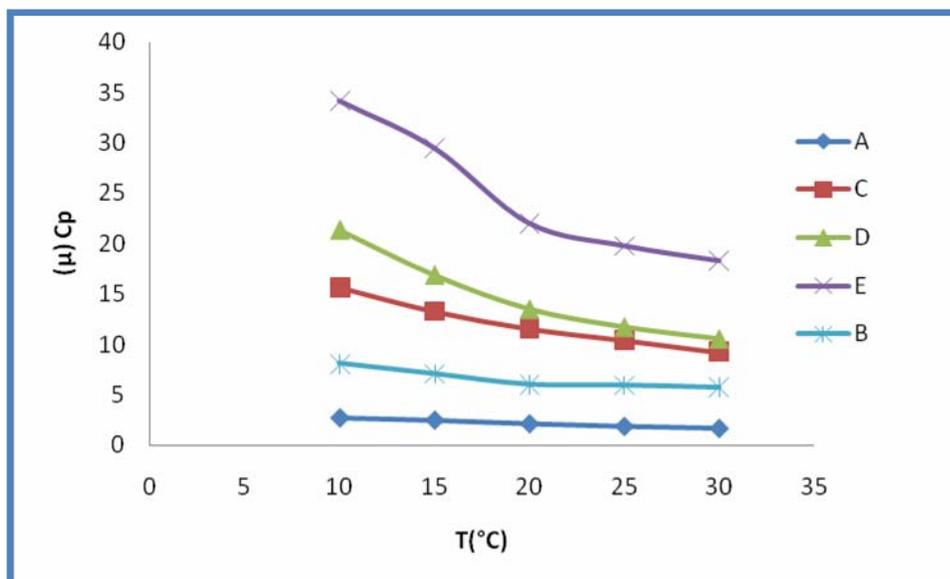
#### 4.3.1. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad para los diferentes jugos y néctares

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de las mediciones de las viscosidades de los jugos y néctares a diferentes temperaturas realizadas con la Copa Ford N° 2.

**Tabla 4.4. Datos de viscosidad dinámica de los jugos y néctares a diferentes temperaturas.**

Temperatura (°C)	A	C	D	E	B
	Viscosidad (cP)				
10	2,73	15,62	21,37	34,14	8,09
15	2,50	13,24	16,88	29,50	7,08
20	2,14	11,53	13,48	22,05	6,06
25	1,88	10,40	11,70	19,82	5,98
30	1,68	9,20	10,51	18,33	5,75

En el anexo A.1 se dispone de los tiempos de descarga de los néctares, de los resultados de las conversiones de unidades de viscosidad cinemática y de las densidades de cada muestra a 20 °C con la Copa Ford N° 2. En la figura 4.2 se exhibe las variaciones de las viscosidades dinámicas a diferentes temperaturas.



**Figura 4.2. Viscosidad para jugos y néctares a diferentes temperaturas.**

Los resultados indicaron que las viscosidades dinámicas de los jugos y néctares estudiados disminuyeron con el aumento de la temperatura, reflejando una reducción bastante apreciable en la viscosidad del néctar de E a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, en el néctar de D y similarmente en el de C también se evidenciaron descensos de sus viscosidades con el incremento de la temperatura con valores muy próximos de sus viscosidades a 30 °C (9,20 y 10,51 cP), para los néctares de C y de D, respectivamente. A su vez se obtuvo una disminución más leve para el néctar de B y otra poco apreciable para el jugo de A.

Adicionalmente, en el intervalo de 10 a 20 °C, los descensos de las viscosidades con la elevación de la temperatura fueron más abruptos para los néctares de las frutas E, D y C en ese orden, que los exhibidos entre 20 y 30 °C. Ésta tendencia también estuvo presente, aunque con mucho más atenuación, en el néctar de la fruta B.

Finalmente se puede apreciar que el néctar de E tiene una viscosidad mucho mayor que el resto de los néctares y jugo en un intervalo de (34,14 y 18,33 cP a 10 y 30 °C, respectivamente). Siendo el de menor viscosidad en jugo de A con una viscosidad entre (2,73 y 1,68 cP a 10 y 30 °C, respectivamente).

Al aplicarle la ecuación de Arrhenius a éstos valores para comprobar el efecto de la temperatura sobre la viscosidad, se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre 0,897 y 0,995 (tabla 4.5). Éstos resultados confirman que la ecuación de Arrhenius explica de manera confiable el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los néctares y jugos.

Los valores de energías de activación ( $E_a$ ) y de la constante de Arrhenius ( $A_0$ ) para los jugos y néctares de frutas (tabla 4.5) mostraron tendencias diversas con el aumento de la temperatura. En primer lugar, el néctar de la fruta D exhibió los valores más altos de la energía de activación (25,55 kJ/mol) y de la constante de Arrhenius ( $-3,95E-4$  cP) entre los cinco productos estudiados. Por otra parte, el néctar B mostró los valores más bajos tanto de la energía de activación (12,21 KJ/mol) como de la constante  $A_0$  ( $-4,32E-2$  cP).

Ello significa que en el néctar D la influencia de la temperatura sobre la viscosidad dinámica es el doble que en el caso del néctar B, en el intervalo de 10 a 30 °C. Los restantes néctares (A, C y E) constituyen el grupo de productos con valores intermedios de las energías de activación y de las constante de Arrhenius. Aunque el néctar E reveló ser susceptible a la influencia de la temperatura sobre su viscosidad, muy cercana (92 %) al caso del néctar D.

Estos resultados evidencian que los mayores efectos de la variación de la temperatura sobre el índice de consistencia revelados para los néctares D y E, en ese orden, es compatible con la presencia compuestos moleculares complejos, que facilitan los cambios de sus viscosidades en mayores magnitudes, al variar la temperatura; por ejemplo, compuestos modificadores de viscosidad.

El efecto de la posible presencia de estos compuestos fue decreciente para los demás jugos y néctares (C, A y B). Por su parte, los contenidos de sólidos solubles (entre 11,26 y 13,52 °Brix) en estos productos no parecieron haber afectado a sus energías de activación en el intervalo de temperaturas estudiado.

Por otra parte, desde el anexo D.1 hasta D.5, se encuentran los coeficientes de ajustes realizados a los valores de viscosidad con la ecuación de Arrhenius.

**Tabla 4.5. Términos calculados a partir del ajuste de la ecuación de Arrhenius para los jugos y néctares**

<b>NÉCTAR/ JUGO</b>	<b>A<sub>0</sub></b>	<b>E<sub>a</sub> (kJ/mol)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
D	-3,95E-04	25,55	0,979
E	-1,56E-03	23,48	0,957
C	-5,78E-03	18,55	0,995
A	-1,41E-03	17,85	0,993
B	-4,32E-02	12,21	0,897

#### 4.3.2. Efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia para las pulpas de frutas

Al aplicarle la ecuación de Herschel-Bulkley a las diferentes pulpas se obtuvieron coeficientes de correlación ( $R^2$ ) de 0,8395 y 0,8815, siendo estos valores los más bajos ya que los demás valores resultaron mayores a 0,8815 y menores a 0,9940 (anexo E.1), lo que indica la buena aceptabilidad del modelo para determinar los parámetros reológicos  $k$  y  $n$ . De igual manera en el anexo E.2 se presentan los coeficientes de correlación al aplicar la ecuación polinómica para determinar  $\tau_0$ .

En cuanto a la influencia de la temperatura sobre los parámetros reológicos índice de consistencia ( $k$ ) y esfuerzo de cedencia ( $\tau_0$ ), de las pulpas estudiadas, los resultados se presentan en la tabla 4.6 y figuras 4.3 y 4.4, respectivamente.

**Tabla 4.6. Valores de índice de consistencia y esfuerzo de cedencia para las pulpas**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>A</b>		<b>C</b>		<b>D</b>		<b>E</b>		<b>B</b>	
	<b>k (Cp)</b>	<b><math>\tau_0</math> (mPa)</b>								
0	3,033	6,16	0,651	12,47	3,011	59,5	6,391	177,1	6,883	221,9
5	2,619	5,95	0,609	12,51	2,749	57,16	5,496	154,7	6,124	198,9

10	2,06 4	5,92	0,57	12,4	2,34 9	55,92	4,19 6	153	5,64 5	194,7
15	1,92 8	5	0,48 7	12,13	1,81 3	53,99	3,43 4	151,9	4	193,5
20	1,05 8	4,39	0,40 7	12	1,71 4	52,17	3,05	137,9	3,03 8	172
25	0,87 5	4,01	0,38 7	10,88	1,64 7	50,41	2,53 4	130,2	2,68 9	163,1

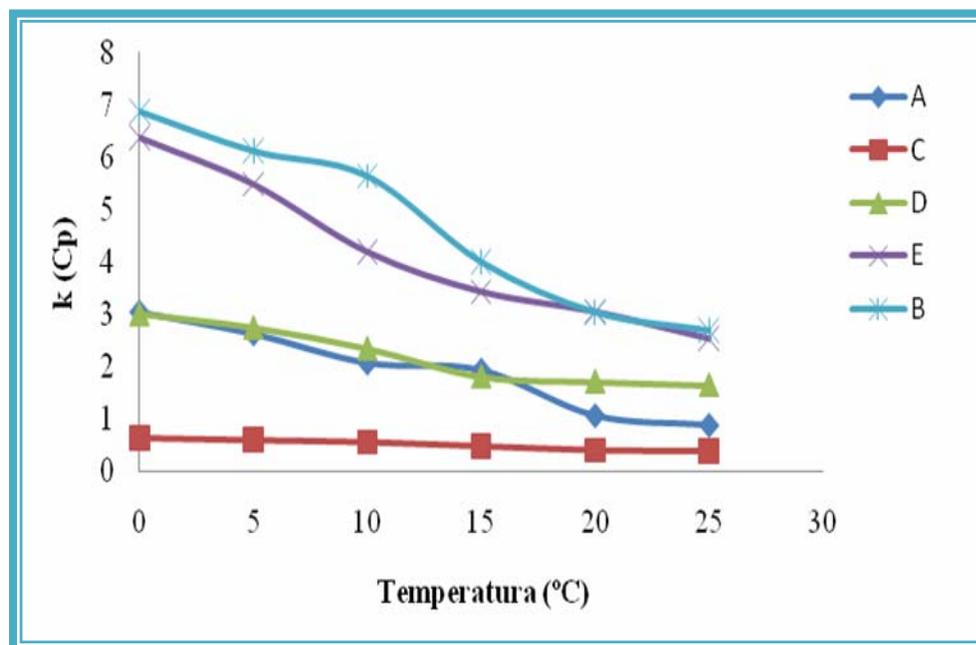
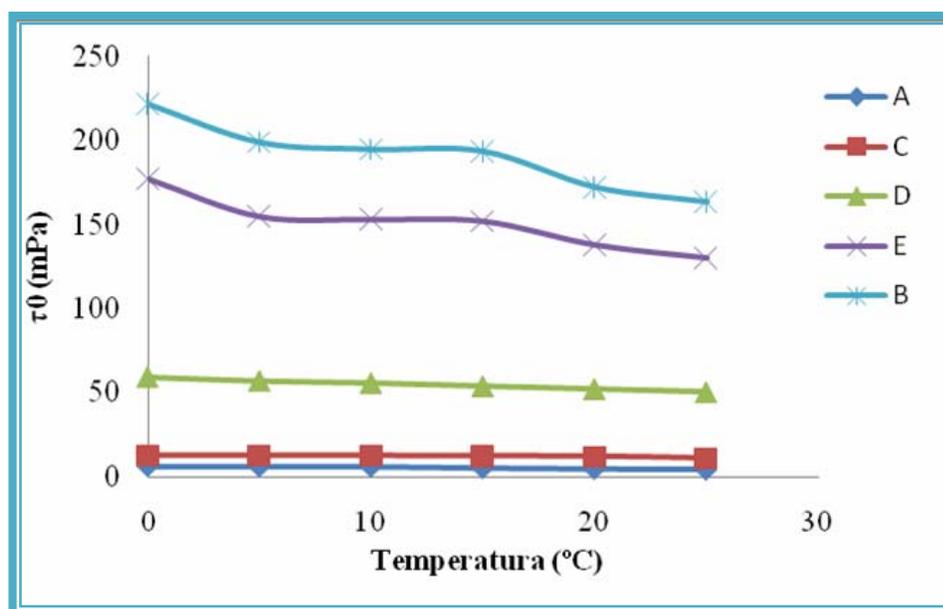


Figura 4.3. Índice de consistencia para las pulpas a diferentes temperaturas.



**Figura 4.4. Esfuerzo de cedencia para las pulpas a diferentes temperaturas.**

La pulpa B exhibió el más alto índice de consistencia desde 0 a 20 °C, seguida de la pulpa E en este mismo intervalo; sin embargo entre 20 y 25 °C estas dos pulpas tuvieron el mismo comportamiento (idénticos valores de índice de consistencia). Mientras, entre 0 y 15 °C este parámetro reológico para las pulpas D y A no evidenciaron diferencias significativas, pero en el intervalo 15 a 25 °C el índice de consistencia de la pulpa A descendió aun más, y el de la pulpa D permaneció invariable. Por su parte la pulpa C no exhibió variación significativa en su índice de consistencia entre 0 y 25 °C, la cual los mínimos índices de consistencia.

En relación a los máximos niveles de esfuerzos cedentes en todo el intervalo de 0 a 20 °C, la pulpa B superó a todas las demás, seguida de la pulpa E; destacándose que ambas pulpas mostraron tendencias muy similares en sus valores de esfuerzo cedente: una pequeña declinación entre 0 y 5 °C; valores constantes entre 5 y 15 °C; y un descenso adicional en ambas pulpas entre 15 y 20 °C.

En el caso de la pulpa D, este parámetro reológico presentó una muy leve variación en todo el rango de temperatura estudiado (en tercer lugar en orden de magnitud); y finalmente los esfuerzos de cedencia de las pulpas C y A fueron muy próximos entre sí en el mismo intervalo de temperatura con tendencia invariable, siendo la pulpa A la que arrojó los más bajos valores de  $\tau_0$ . Los ajustes realizados a los valores de índice de consistencia se encuentran en los anexos E.3 a E.7; similarmente, los coeficientes de correlación correspondientes a las regresiones para determinar los esfuerzos cedentes con la ecuación de Arrhenius, en anexos E.8 a E.12.

**Tabla 4.7. Valores de la constante de Arrhenius para el índice de consistencia y el esfuerzo de cedencia.**

PULPAS	K			T <sub>0</sub>		
	A <sub>k</sub>	Ea <sub>k</sub> (Kj/mol)	R <sub>K</sub> <sup>2</sup>	A <sub>τ<sub>0</sub></sub>	Ea <sub>τ<sub>0</sub></sub> (Kj/mol)	R <sub>τ<sub>0</sub></sub> <sup>2</sup>
A	-7,97E-07	34,64	0,9286	-2,77E-02	12,399	0,9119
C	-8,05E-04	15,29	0,9615	-3,18E+00	3,157	0,686
D	-1,00E-03	18,19	0,9498	-8,58E+00	4,396	0,995
E	-8,45E-05	25,51	0,9915	-3,18E+00	3,157	0,686
B	-7,95E-05	25,87	0,93	-7,55E+00	7,646	0,926

En cuanto a la dependencia de los índices de consistencia de las pulpas respecto a la variación de temperatura, todas las regresiones para este caso exhibieron alta calidad ( $R^2 \geq 0,9286$ ). El más alto valor de energía de activación correspondió al de la pulpa A; seguido por los de las pulpas B y E (cuyas energías de activación fueron muy similares), y por los de D y C; dando como resultado que la mínima energía de activación fue la de la pulpa C.

Por su parte, las constantes de Arrhenius para los índices de consistencia evidenciaron casi el mismo orden de variación para las pulpas pero en sentido contrario; es decir, con las pulpas C y D con los máximos valores de dichas constantes, y la pulpa A con el valor mínimo. El resultado de estas tendencias significa que mientras en las pulpas C y D las dependencias del índice de consistencia con la temperatura fueron altas, en la pulpa A tal dependencia con temperatura es mínima; pudiéndose variar este parámetro reológico más fácilmente en las pulpas C y D al cambiar la temperatura, y más difícilmente en el caso de la pulpa A.

Respecto al parámetro esfuerzo de cedencia en las pulpas, las regresiones fueron de calidad satisfactoria ( $R^2$  entre 0,9119 y 0,995) en los casos de las pulpas D, B y A; pero no así las correspondientes a las pulpas C y E ( $R^2 = 0,686$ ), con significativas dispersiones de los datos experimentales. Similarmente, la pulpa A resultó con la máxima energía de activación para el esfuerzo cedente, seguida de las pulpas B, D; y de las pulpas C y E, a quienes correspondieron los mínimos e idénticos valores de energías de activación para este parámetro reológico, precisamente las mismas pulpas que arrojaron la peor calidad de las

regresiones. Las mismas tendencias y orden de variación fueron mostradas por los valores de las constantes de Arrhenius para las pulpas.

Con estos resultados del efecto Arrhenius sobre los esfuerzos cedentes de las pulpas estudiadas, se evidencia una vez más que en los rangos de temperatura investigados, la dependencia de este parámetro reológico en la pulpa A respecto a la temperatura es casi inexistente; mientras que estas dependencias con temperatura fueron intermedias en las pulpas B y D. Sin embargo, las dependencias respecto a temperatura mostradas por los resultados correspondientes a las pulpas C y E, no son confiables, por la baja calidad de sus regresiones.

## CONCLUSIONES

1. Dependiendo del grado de viscosidad del fluido, se puede seleccionar uno de estos dos instrumentos (copas Ford o Brookfield) para ser utilizados en mediciones de viscosidad. El viscosímetro rotacional Brookfield sólo realiza mediciones para fluidos muy viscosos.
2. La viscosimetría copas Ford es más apto para fluidos con comportamiento Newtoniano, mientras que la viscosimetría Brookfield se aplica tanto a fluidos Newtonianos como no-Newtonianos.
3. El resultado de la viscosidad para el agua (fluido Newtoniano) obtenido con la Copa Ford N° 2 obtuvo un porcentaje de error de 93,17 % con respecto a la Copa Ford N° 4.
4. Los resultados de viscosidad obtenidos con la Copa Ford N° 2 para el jugo y los néctares fueron mayores a los obtenidos con la Copa Ford N° 4, arrojando diferencias significativas entre los valores de viscosidad medidos en ambos recipientes.
5. Se evidenció una disminución de la viscosidad para los jugos y néctares con el aumento de la temperatura, y el néctar B presentó una mayor sensibilidad en su variación de viscosidad respecto a la variación de la temperatura en el rango de 10 a 30 °C, mientras que las pulpas investigadas, en el intervalo de 0 a 25 °C, exhibieron comportamiento reológico no Newtoniano tipo plástico de Bingham, según el modelo de Herschel-Bulkley, generalmente con calidades satisfactorias en cuanto a los ajustes de los datos experimentales.
6. A 20 °C, la pulpa E exhibió el más elevado índice de consistencia entre todas las pulpas, y las pulpas A y C arrojaron los más bajos. Y en cuanto a los esfuerzos de cedencia las pulpas B y E los más altos valores de este parámetro reológico, y los menores correspondieron a la pulpas C y A.

7. Los índices de consistencia y los esfuerzos cedentes de las pulpas B y E disminuyen muy significativamente con el aumento de la temperatura; pero son esencialmente invariables en los casos de las pulpas A,C y D.
8. En el rango de temperatura estudiado, el valor del índice de comportamiento de flujo de la pulpa A (con mayor concentración de sólidos) fue máximo (0,924); y el de la pulpa C (más diluida) sólo levemente superior (0,846) a los del grupo de pulpas (B, D y E).
9. Las dependencias del índice de consistencia y del esfuerzo cedente respecto a las variaciones de temperatura fueron altas en las pulpas C y D, y mínimas o casi inexistentes en la pulpa A; es decir que al cambiar la temperatura, estos parámetro reológicos se pueden modificar más fácilmente en las pulpas C y D, y más difícilmente en la pulpa A. Aunque los resultados sobre el esfuerzo cedente mediante el modelo de Arrhenius en las pulpas C y E fueron menos confiables, por la baja calidad de sus regresiones.

## RECOMENDACIONES

1. Mantener un mejor control de la temperatura a nivel constante, para la determinación de las viscosidades en los diferentes néctares con las copas Ford.
2. Realizar un estudio de las viscosidades de los jugos y néctares mediante mediciones utilizando la copa Ford N° 1.
3. Realizar las mediciones de viscosidades con mayor número de repeticiones (por triplicado).
4. Hacer un seguimiento periódico de la viscosidad de los néctares, tanto de laboratorio como de planta.
5. Entrenar al personal de la planta involucrado en la elaboración de jugos y néctares, sobre la metodología de medición de la viscosidad de estos productos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. [http://es.wikipedia.org/wiki/Empresas\\_Polar](http://es.wikipedia.org/wiki/Empresas_Polar).
2. <http://www.empresas-polar.com/organigrama.php>.
3. Beligagli K. y Dalgic A. (2007). **“International Journal of Food Science & Technology”**. Blackwell Synergy, Vol 42, p. 773-776.
4. Kawazoe A. y Cunha R. (2007). **“Influencia da temperatura no comportamento reológico da pulpa de jabuticaba”**. Campinas – Sp, Brazil.
5. Dak M., Verma R. y Jaaffrey S. (2006). **“Effect of Temperature an Concentration on Rheological Properties of “Kesar” mango juice”**. Science direct, Vol 80, p. 1011-1015.
6. Mossel y colaboradores. (2000). **“Use of an Arrhenius Model to predict Rheological Behaviour in some Australian Honeys”**. Australia.
7. Alvarado, J. de D. (1992) **“Viscosity and Activation Energy of Filtered Juices”** Ed. Radio Comunicaciones, Quito, Ecuador. p. 87-93.
8. Norma Venezolana COVENIN 1030-95. **“Jugos y Néctares. Características Generales”**. COVENIN.1995.
9. Trinidad, M. y Rosales, R. (2001). **“Elaboración de Néctar”**. Lima, CIED. 49 p.
10. Norma Venezolana COVENIN 1151-77. **“Frutas y Productos Derivados. Determinación de la Acidez”**, COVENIN. 1977.
11. Ashurst P. R. (1999) **“Producción y envasado de zumos y bebidas de frutas sin gas”**, España. Editorial Acribia, S.A, 415 p.
12. Macosko, C.W. (1994), **“Rheology, Principles, Measurements and Aplications”**, New York. VCH Publishers.
13. Steffe, J (1992), **“Rheological Methods in Food Process Engineering”**, USA. Ed. Pergamon Press. 428 p.

14. Hernández, J. **“Estudio del efecto del proceso de homogenización en las propiedades reológicas de los néctares de frutas”**. Trabajo de Grado UCV, Departamento de Química, Caracas (2008).
15. Tiu, C. and D.V. Boger. 1974. **“Complete rheological characterization of time-dependent food products”**. J. Texture Stud. 5: 329-338.
16. Saravacos, G.D. (1970). **“Effect of temperature on viscosity of juices and purees. J. Food”**. Sci., Vol. 35, 122-125.
17. Sherman, P. 1970. **“Industrial Rheology. Academic Press”**. New York.
18. Bourne, M.C. 1982. **“Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement”**. Academic Press, New York.
19. White F., (1979), **“Mecánica de fluidos”**, México. McGraw-Hill. 753 p.
20. Pierce, P. (1982), **“Rheological Measurements”**, New York. Ed. John Wiley & Sons.
21. Woyzechowsky, L., (2002). **“Estudio de reología y transformación del almidón de maíz en un reómetro capilar”**. Trabajo de Grado presentado a la Universidad Simón Bolívar. 99 p.
22. Barnes, H.A, Hutton, J.F. and Walters, K. (1989), **“An Introduction To Rheology”**, New York. Elsevier Sciences. 212 p.
23. Brookfield. (2000), **“More solutions to sticky problems”**. USA. Ed Board. 53 p.
24. Rao, M.A. (1999). **“Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications”**. Maryland: Aspen Publishers Inc., 1999. 433.
25. Chhabra R., Richardson J. (1999), **“Non-Newtonian flow in the process Industries: Fundamentals and Engineering Applications”**, Gran Bretaña. Laser Words. 436 p.
26. Rauendaal C. (1988), **“Mixing in Polymer Processing”**, Munich, Hanser. 337 p.
27. Alderman N., Chen C (2004), **“Non-Newtonian fluids: Guide to classification and characteristics”**. London. ESDU. 36p.
28. Barbosa Canovas, G.V. and M Peleg. 1983. **“Flow parameters of selected commercial semi-liquid food products”**. J. Texture Stud. 14: 213-234.

29. Kokini, J.L. 1992. **“Rheological properties of food”**. In: Heldman, D.R. and D.B. Lund (editors). Handbook of Food Engineering. Marcel Dekker, New York. Pg. 1-38.
30. Vitali, A.A. and M.A. Rao. 1984. **“Flow properties of flow pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration”**. J. Foods Sci. 49:882-888.
31. Rao, M.A. 1992. **“Rheological behavior of tomato pastes in steady and dynamic shear”**. Rizvi (editors). New York. pg. 215-254.
32. Harper, J.C. and A.F. El Sahrigi. 1965. **“Viscometric behavior of tomato concentrates”**. J. Food Sci. 30: 470-476.
33. R. Paul y Denis R. 1997. **“Introducción a la Ingeniería de los Alimentos”**. Editorial Acrabia. España.
34. Briceño M. (2000). **“Rheology of Suspensions and Emulsión”**. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 52p.
35. **“Manual de métodos de muestreo y prueba de materiales”**. (2008).
36. [http://www.hoskin.qc.ca/uploadpdf/Geotechnique/CANNON/hoskin\\_Viscosity%20Standards%20for%20Zahn,%20Shell,%20and%20Ford%20Cups\\_4762a3ecf10a0.pdf](http://www.hoskin.qc.ca/uploadpdf/Geotechnique/CANNON/hoskin_Viscosity%20Standards%20for%20Zahn,%20Shell,%20and%20Ford%20Cups_4762a3ecf10a0.pdf)
37. P.Mitschka (1982). **“Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions”**. Czechoslovak Academy of Sciences.
38. McCabe W. **“Operaciones unitarias en ingeniería química”** 4<sup>ta</sup> Ed., E. McGraw Hill, España, 1998.

## ANEXO A

**Tabla A.1. Mediciones de viscosidad cinemática y densidades de los diferentes jugos y néctares a 20 °C en la Copa Ford N° 2**

<b>MUESTRA</b>	<b>TIEMPO (seg)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)</b>	<b>DENSIDAD (g/mol)</b>	<b>VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)</b>
A	19,41	2,030	1,0544	2,141
C	25,67	11,039	1,0444	11,529
D	26,87	12,777	1,0549	13,479
E	33,32	22,054	1,0464	23,078
B	22,39	6,321	1,0441	6,600
Agua	18,85	1,228	0,9984	1,23

**Tabla A.2. Mediciones de viscosidad cinemática y densidades de los diferentes jugos y néctares a 20 °C en la Copa Ford N° 4**

<b>MUESTRA</b>	<b>TIEMPO (seg)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)</b>	<b>DENSIDAD (g/mol)</b>	<b>VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)</b>
A	9,24	18,271	1,0544	19,266
C	11,96	28,746	1,0444	30,0227
D	12,42	30,529	1,0549	32,2046
E	14,56	38,782	1,0464	40,583
B	10,48	23,061	1,0441	24,078
Agua	9,16	17,99	0,9984	17,96

**Tabla A.3. Mediciones de viscosidad cinemática y densidades para el jugo de A a las diferentes temperaturas con la Copa Ford N° 2**

<b>TEMPERATURA (° C)</b>	<b>TIEMPO (seg)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)</b>	<b>DENSIDAD (g/mol)</b>	<b>VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)</b>
10	19,80	2,592	1,0534	2,730
15	19,64	2,368	1,0539	2,495
20	19,41	2,030	1,0544	2,141
25	19,24	1,778	1,0549	1,876
30	19,11	1,594	1,0554	1,683

**Tabla A.4. Mediciones de viscosidad cinemática y densidades para el néctar de B a las diferentes temperaturas con la Copa Ford N° 2**

<b>TEMPERATURA (° C)</b>	<b>TIEMPO (seg)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)</b>	<b>DENSIDAD (g/mol)</b>	<b>VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)</b>
10	23,38	7,751	1,0431	8,085
15	22,71	6,786	1,0436	7,082
20	22,39	6,321	1,0441	6,600
25	21,97	5,723	1,0446	5,978
30	21,82	5,501	1,0451	5,749

**Tabla A.5. Mediciones de viscosidad cinemática y densidades para el néctar de D a las diferentes temperaturas con la Copa Ford N° 2**

<b>TEMPERATURA (° C)</b>	<b>TIEMPO (seg)</b>	<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)</b>	<b>DENSIDAD (g/mol)</b>	<b>VISCOSIDAD DINÁMICA (cP)</b>
10	32,08	20,278	1,0539	21,3712
15	29,12	16,006	1,0544	16,8769
20	26,87	12,777	1,0549	13,4785
25	25,70	11,082	1,0554	11,6959
30	24,91	9,950	1,0559	10,5060

## ANEXO B

**Tabla B.1. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 0 ° C.**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	30	1,477	94,6	99,28	27,61
5	20	1,301	84,4	88,57	18,41
5	12	1,079	79,0	82,90	11,04
5	10	1,000	74,7	78,38	9,20
5	6	0,778	69,0	72,45	5,52
5	5	0,699	65,3	68,51	4,60
6	100	2,000	49,2	115,54	78,10
6	60	1,778	44,7	105,05	46,86
6	50	1,699	41,4	97,21	39,05
6	30	1,477	38,6	90,63	23,43
6	20	1,301	34,7	81,47	15,62
6	12	1,079	31,7	74,50	9,37
6	10	1,000	29,6	69,64	7,81
6	6	0,778	26,3	61,73	4,69
6	5	0,699	25,7	60,47	3,91
7	100	2,000	15,9	133,14	81,85
7	60	1,778	14,8	124,32	49,11
7	50	1,699	14,0	117,60	40,93
7	30	1,477	12,6	105,84	24,56
7	20	1,301	10,6	89,04	16,37

**Tabla B.2. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 5 ° C.**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	60	1,778	98,7	103,64	57,88
5	50	1,699	97,0	101,85	48,24
5	30	1,477	88,9	93,31	28,94
5	20	1,301	81,4	85,44	19,29
5	12	1,079	75,2	78,96	11,58
5	10	1,000	72,5	76,13	9,65
5	6	0,778	65,4	68,67	5,79
5	5	0,699	62,4	65,56	4,82
6	100	2,000	47,6	111,74	78,07
6	60	1,778	43,2	101,60	46,84
6	50	1,699	40,0	94,08	39,04
6	30	1,477	36,7	86,32	23,42
6	20	1,301	32,3	75,83	15,61
6	12	1,079	31,2	73,32	9,37
6	10	1,000	28,7	67,52	7,81
6	6	0,778	26,3	61,73	4,68
6	5	0,699	23,9	56,17	3,90
7	100	2,000	13,7	115,36	97,70
7	60	1,778	13,2	110,46	58,62
7	50	1,699	12,3	102,90	48,85
7	30	1,477	10,8	90,72	29,31
7	20	1,301	10,1	84,84	19,54

**Tabla B.3. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 10 ° C**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	50	1,699	95,9	100,66	47,59
5	30	1,477	89,9	94,40	28,55
5	20	1,301	80,2	84,21	19,04
5	12	1,079	75,0	78,75	11,42
5	10	1,000	71,0	74,55	9,52
5	6	0,778	66,0	69,34	5,71
5	5	0,699	62,1	65,17	4,76
6	100	2,000	44,9	105,52	77,75
6	60	1,778	40,7	95,65	46,65
6	50	1,699	37,3	87,66	38,87
6	30	1,477	35,1	82,56	23,32
6	20	1,301	31,1	73,01	15,55
6	12	1,079	28,7	67,37	9,33
6	10	1,000	26,9	63,22	7,77
6	6	0,778	25,0	58,67	4,66
6	5	0,699	22,6	53,11	3,89
7	100	2,000	14,6	122,92	94,83
7	60	1,778	12,5	104,72	56,90
7	50	1,699	11,9	100,24	47,42
7	30	1,477	11,2	94,08	28,45
7	20	1,301	10,2	85,68	18,97

**Tabla B.4. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 15 ° C**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	60	1,778	96,6	101,38	55,42
5	50	1,699	90,1	94,57	46,18
5	30	1,477	83,1	87,26	27,71
5	20	1,301	78,2	82,15	18,47
5	12	1,079	69,7	73,22	11,08
5	10	1,000	67,8	71,16	9,24
5	6	0,778	60,6	63,63	5,54
5	5	0,699	58,5	61,46	4,62
6	100	2,000	42,3	99,41	79,36
6	60	1,778	38,7	91,02	47,61
6	50	1,699	35,9	84,29	39,68
6	30	1,477	34,1	80,21	23,81
6	20	1,301	30,6	71,91	15,87
6	12	1,079	28,2	66,35	9,52
6	10	1,000	25,9	60,94	7,94
6	6	0,778	23,6	55,38	4,76
6	5	0,699	21,9	51,39	3,97
7	100	2,000	15,0	126,00	80,27
7	60	1,778	13,2	110,88	48,16
7	50	1,699	12,5	105,00	40,14
7	30	1,477	11,1	93,24	24,08

**Tabla B.5. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 20 ° C**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	60	1,7782	91,6	96,15	56,26
5	50	1,6990	85,2	89,43	46,88
5	30	1,4771	80,0	84,04	28,13
5	20	1,3010	71,9	75,46	18,75
5	12	1,0792	67,9	71,33	11,25
5	10	1,0000	63,3	66,47	9,38
5	6	0,7782	59,0	61,95	5,63
5	5	0,6990	55,3	58,03	4,69
6	100	2,0000	40,5	95,10	82,38
6	60	1,7782	37,2	87,42	49,43
6	50	1,6990	34,8	81,86	41,19
6	30	1,4771	32,6	76,61	24,71
6	20	1,3010	28,7	67,37	16,48
6	12	1,0792	26,2	61,65	9,89
6	10	1,0000	24,6	57,81	8,24
6	6	0,7782	23,7	55,77	4,94
6	5	0,6990	21,9	51,54	4,12
7	100	2,0000	11,7	98,00	116,79
7	60	1,7782	10,6	89,04	70,07
7	50	1,6990	10,4	87,36	58,39

**Tabla B.6. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de D a 25 ° C.**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
5	100	2,000	98,7	103,64	88,36
5	60	1,778	89,5	93,94	53,01
5	50	1,699	83,9	88,13	44,18
5	30	1,477	78,0	81,90	26,51
5	20	1,301	70,8	74,31	17,67
5	12	1,079	66,0	69,30	10,60
5	10	1,000	62,3	65,38	8,84
5	6	0,778	56,3	59,15	5,30
5	5	0,699	51,2	53,73	4,42
6	100	2,000	38,6	90,79	79,41
6	60	1,778	35,4	83,19	47,65
6	50	1,699	33,1	77,79	39,71
6	30	1,477	31,5	74,10	23,82
6	20	1,301	27,4	64,31	15,88
6	12	1,079	25,2	59,30	9,53
6	10	1,000	23,5	55,15	7,94
6	6	0,778	22,0	51,78	4,76
6	5	0,699	20,1	47,16	3,97
7	100	2,000	12,8	107,80	159,84
7	60	1,778	11,9	99,54	95,90
7	50	1,699	11,5	96,18	79,92
7	30	1,477	11,1	93,24	47,95
7	20	1,301	10,4	87,36	31,97

**Tabla B.7. Valores obtenidos con el viscosímetro de Brookfield para la pulpa de A a 0 ° C.**

<b>Spindle</b>	<b>N (RPM)</b>	<b>Log(RPM)</b>	<b>%<math>\alpha</math></b>	<b><math>\tau</math> (Pa)</b>	<b><math>\dot{\gamma}</math> (s-1)</b>
3	20	1,301	93,7	26,14	7,90
3	12	1,079	69,0	19,24	4,74
3	10	1,000	61,0	17,03	3,95
3	6	0,778	45,7	12,74	2,37
3	5	0,699	41,1	11,46	1,98
4	50	1,699	86,6	46,66	18,71
4	30	1,477	62,5	33,69	11,23
4	20	1,301	47,7	25,73	7,48
4	12	1,079	34,3	18,49	4,49
4	10	1,000	31,1	16,74	3,74
4	6	0,778	22,7	12,24	2,25
4	5	0,699	20,6	11,12	1,87
5	100	2,000	69,4	72,84	36,80
5	60	1,778	50,1	52,57	22,08
5	50	1,699	43,5	45,68	18,40
5	30	1,477	31,9	33,53	11,04
5	20	1,301	24,0	25,17	7,36
5	12	1,079	17,9	18,83	4,42
5	10	1,000	15,6	16,42	3,68
5	6	0,778	11,8	12,43	2,21
5	5	0,699	10,6	11,13	1,84

## ANEXO C

**Tabla C.1. Factores de conversión resultantes de las agujas para las diferentes pulpas a 0 °C**

	Spindle	$k_{ar}$	$n_{ap}$	$K_{N\dot{V}}$
<b>D</b>	5	1,05	0,20	0,9202
	6	2,35	0,22	0,7810
	7	8,40	0,25	0,8185
<b>A</b>	3	0,279	0,59	0,3952
	4	0,539	0,63	0,3752
	5	1,05	0,63	0,3680
<b>B</b>	6	2,35	0,17	0,9500
	7	8,40	0,19	1,0554
<b>E</b>	6	2,35	0,22	0,7742
	7	8,40	0,16	1,2442
<b>C</b>	3	0,279	0,27	0,7089
	4	0,539	0,27	0,7089
	5	1,05	0,26	0,7395

**Tabla C.2. Factores de conversión resultantes de las agujas para las diferentes pulpas a 5 °C**

	Spindle	$k_{ar}$	$n_{ap}$	$K_{N\dot{V}}$
<b>D</b>	5	1,05	0,18	0,9647
	6	2,35	0,22	0,7807
	7	8,40	0,21	0,9770
<b>A</b>	3	0,279	0,51	0,3987
	4	0,539	0,6	0,3809
	5	1,05	0,63	0,3654
<b>B</b>	6	2,35	0,16	1,0070
	7	8,40	0,19	1,0265
<b>E</b>	6	2,35	0,20	0,8355
	7	8,40	0,18	1,0911
<b>C</b>	3	0,279	0,27	0,7114
	4	0,539	0,27	0,7148
	5	1,05	0,26	0,7252

**Tabla C.3. Factores de conversión resultantes de las agujas para las diferentes pulpas a 10 °C**

	Spindle	$k_{ar}$	$n_{ap}$	$K_{N\dot{V}}$
<b>D</b>	5	1,05	0,19	0,9518
	6	2,35	0,22	0,7774
	7	8,40	0,21	0,9483
<b>A</b>	3	0,279	0,58	0,4007
	4	0,539	0,61	0,3827
	5	1,05	0,60	0,3817
<b>B</b>	6	2,35	0,16	1,0125
	7	8,40	0,20	1,0250
<b>E</b>	6	2,35	0,25	0,7012
	7	8,40	0,18	1,0831
<b>C</b>	3	0,279	0,26	0,7221
	4	0,539	0,26	0,7372
	5	1,05	0,26	0,7465

**Tabla C.4. Factores de conversión resultantes de las agujas para las diferentes pulpas a 15 °C**

	Spindle	$k_{ar}$	$n_{ap}$	$K_{N\dot{V}}$
<b>D</b>	5	1,05	0,19	0,9236
	6	2,35	0,21	0,7936
	7	8,40	0,25	0,8027
<b>A</b>	3	0,279	0,58	0,4010
	4	0,539	0,61	0,3864
	5	1,05	0,60	0,3846
<b>B</b>	6	2,35	0,17	0,9336
	7	8,40	0,22	0,9221
<b>E</b>	6	2,35	0,23	0,7631
	7	8,40	0,22	0,9234
<b>C</b>	3	0,279	0,24	0,7589
	4	0,539	0,25	0,7600
	5	1,05	0,25	0,7618

## ANEXO D

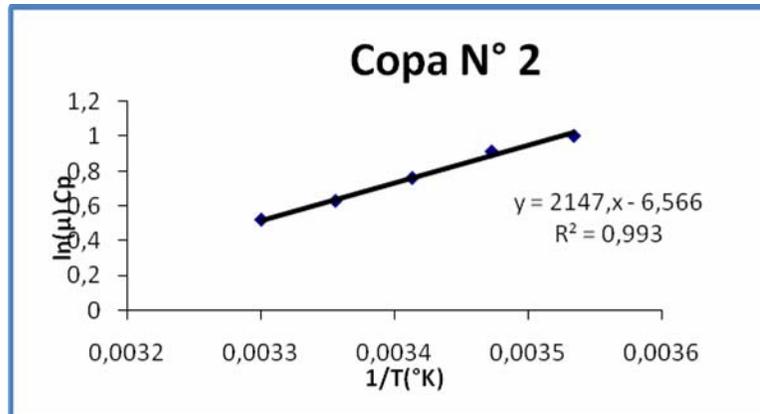


Figura D.1. Ajuste realizado a las viscosidades medidas del jugo A con la ecuación de Arrhenius

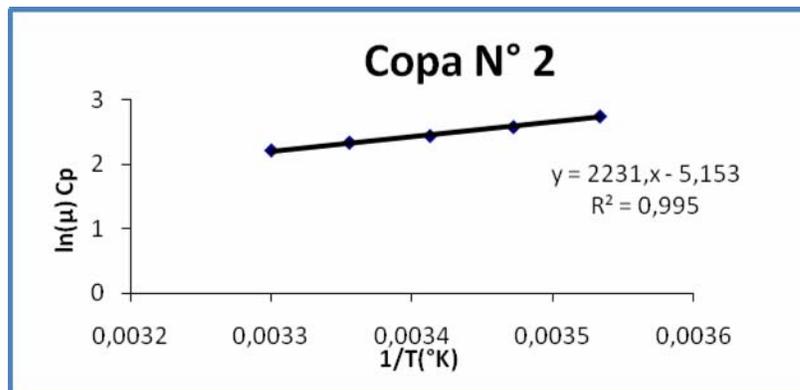
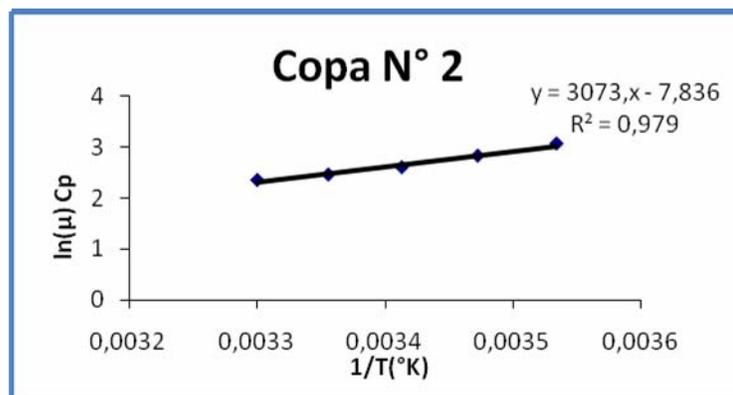
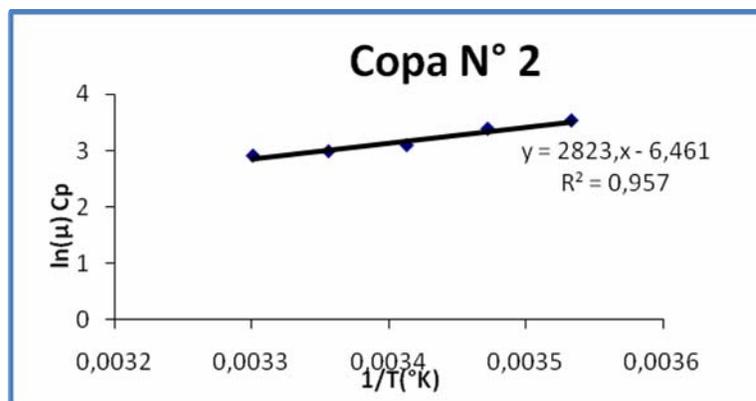


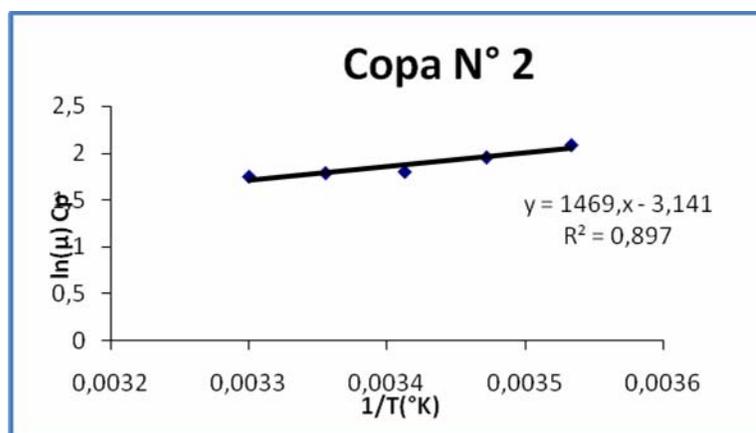
Figura D.2. Ajuste realizado a las viscosidades medidas del néctar C con la ecuación de Arrhenius.



**Figura D.3. Ajuste realizado a las viscosidades medidas del néctar D con la ecuación de Arrhenius.**



**Figura D.4. Ajuste realizado a la a las viscosidades medidas del néctar E con la ecuación de Arrhenius.**



**Figura D.5. Ajuste realizado a las viscosidades medidas del néctar B con la ecuación de Arrhenius.**

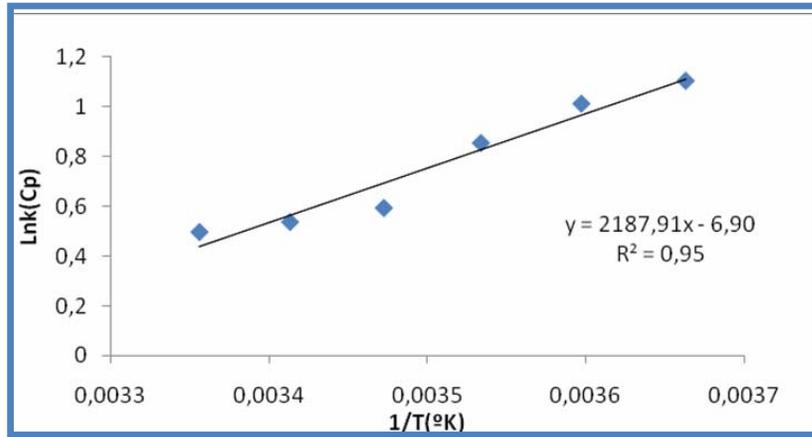
## ANEXO E

**Tabla E.1. Valores de  $R^2$  para todas las pulpas al utilizar la ecuación de Herschel-Bulkley**

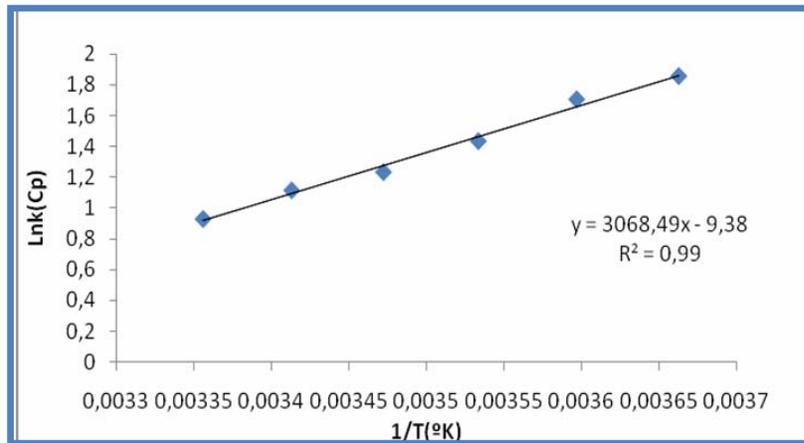
Temperatura °C	A	C	D	E	B
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
0	0,9833	0,9751	0,9255	0,9690	0,9295
5	0,9940	0,9773	0,9443	0,9295	0,9700
10	0,9927	0,9649	0,9495	0,9151	0,9760
15	0,9903	0,9703	0,9220	0,9180	0,8395
20	0,9847	0,9613	0,9377	0,9510	0,9170
25	0,9937	0,9757	0,9433	0,9334	0,8815

**Tabla E.2. Valores de  $R^2$  para todas las pulpas al aplicar la ecuación polinómica para determinar  $\tau_0$**

Temperatura °C	A	C	D	E	B
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
0	0,9989	0,9961	0,9799	0,9694	,9655
5	0,9989	0,9952	0,9842	0,9855	,9179
10	0,9995	0,9955	0,9822	0,971	,9372
15	0,9958	0,9946	0,9716	0,9854	,9788
20	0,9972	0,9939	0,9805	0,9709	,9693
25	0,9996	0,9951	0,9704	0,9892	,9678



**Figura E.3. Ajuste realizado a la B con la ecuación de Arrhenius para el índice de consistencia.**



**Figura E.4. Ajuste realizado a la pulpa de D con la ecuación de Arrhenius para el índice de consistencia.**

## ANEXO F

**Tabla F.1. Ecuaciones lineales para la pulpa D al aplicar el modelo de Herschel-Bulkley a diferentes temperaturas.**

Temperaturas	N° de la aguja	
	5	6
0 °C	$y = 0,845x + 0,905$ $R^2 = 0,957$	$y = 0,662x + 1,266$ $R^2 = 0,966$
5 °C	$y = 0,790x + 0,750$ $R^2 = 0,927$	$y = 0,680x + 1,217$ $R^2 = 0,960$
10 °C	$y = 0,780x + 0,890$ $R^2 = 0,937$	$y = 0,760x + 0,816$ $R^2 = 0,962$
15 °C	$y = 0,847x + 0,541$ $R^2 = 0,934$	$y = 0,791x + 0,646$ $R^2 = 0,910$
20 °C	$y = 0,867x + 0,381$ $R^2 = 0,907$	$y = 0,750x + 0,675$ $R^2 = 0,968$
25 °C	$y = 0,765x + 0,649$ $R^2 = 0,931$	$y = 0,746x + 0,719$ $R^2 = 0,954$

**Tabla F.2. Ecuaciones lineales para la pulpa A al aplicar el modelo de Herschel-Bulkley a diferentes temperaturas.**

Temperaturas	N° de la aguja		
	3	4	5
0 °C	$y = 0,840x + 1,255$ $R^2 = 0,966$	$y = 0,896x + 1,144$ $R^2 = 0,995$	$y = 0,945x + 0,897$ $R^2 = 0,989$
5 °C	$y = 0,859x + 1,133$ $R^2 = 0,997$	$y = 0,920x + 0,843$ $R^2 = 0,991$	$y = 0,885x + 0,887$ $R^2 = 0,994$
10 °C	$y = 0,854x + 0,956$ $R^2 = 0,996$	$y = 0,922x + 0,620$ $R^2 = 0,988$	$y = 0,906x + 0,550$ $R^2 = 0,994$
15 °C	$y = 0,880x + 0,534$ $R^2 = 0,993$	$y = 0,860x + 0,523$ $R^2 = 0,993$	$y = 0,748x + 0,872$ $R^2 = 0,985$
20 °C	$y = 0,946x + 0,056$ $R^2 = 0,967$	$y = 0,948x - 0,030$ $R^2 = 0,989$	$y = 0,879x + 0,137$ $R^2 = 0,998$
25 °C	$y = 0,93x - 0,016$ $R^2 = 0,987$	$y = 0,916x - 0,167$ $R^2 = 0,996$	$y = 0,868x - 0,072$ $R^2 = 0,998$

**Tabla F.3. Ecuaciones lineales para la pulpa C al aplicar el modelo de Herschel-Bulkley a diferentes temperaturas.**

Temperaturas	N° de la aguja		
	3	4	5
0 °C	$y = 0,8476x - 0,4033$ $R^2 = 0,9729$	$y = 0,8161x - 0,4426$ $R^2 = 0,9762$	$y = 0,883x - 0,753$ $R^2 = 0,973$
5 °C	$y = 0,862x - 0,474$ $R^2 = 0,973$	$y = 0,825x - 0,516$ $R^2 = 0,979$	$y = 0,824x - 0,496$ $R^2 = 0,979$
10 °C	$y = 0,739x - 0,345$ $R^2 = 0,983$	$y = 0,841x - 0,680$ $R^2 = 0,962$	$y = 0,851x - 0,704$ $R^2 = 0,961$
15 °C	$y = 0,801x - 0,625$ $R^2 = 0,976$	$y = 0,844x - 0,792$ $R^2 = 0,967$	$y = 0,840x - 0,747$ $R^2 = 0,968$
20 °C	$y = 0,860x - 0,947$ $R^2 = 0,960$	$y = 0,819x - 0,803$ $R^2 = 0,971$	$y = 0,858x - 0,958$ $R^2 = 0,953$
25 °C	$y = 0,744x - 0,847$ $R^2 = 0,986$	$y = 0,851x - 0,969$ $R^2 = 0,970$	$y = 0,834x - 0,883$ $R^2 = 0,969$

**Tabla F.4. Ecuaciones lineales para la pulpa E al aplicar el modelo de Herschel-Bulkley a diferentes temperaturas.**

Temperaturas	N° de la aguja	
	6	7
0 °C	$y = 0,725x + 1,693$ $R^2 = 0,960$	$y = 0,548x + 1,994$ $R^2 = 0,977$
5 °C	$y = 0,723x + 1,617$ $R^2 = 0,978$	$y = 0,686x + 1,623$ $R^2 = 0,925$
10 °C	$y = 0,797x + 1,407$ $R^2 = 0,976$	$y = 0,800x + 1,318$ $R^2 = 0,867$
15 °C	$y = 0,656x + 1,861$ $R^2 = 0,983$	$y = 0,844x + 1,227$ $R^2 = 0,954$
20 °C	$y = 0,844x + 1,24$ $R^2 = 0,973$	$y = 0,786x + 1,463$ $R^2 = 0,942$
25 °C	$y = 0,797x + 1,177$ $R^2 = 0,906$	$y = 0,681x + 1,817$ $R^2 = 0,96$

**Tabla F.5. Ecuaciones lineales para la pulpa B al aplicar el modelo de Herschel-Bulkley a diferentes temperaturas**

Temperaturas	N° de la aguja	
	6	7
0 °C	$y = 0,635x + 1,871$ $R^2 = 0,994$	$y = 0,601x + 1,984$ $R^2 = 0,923$
5 °C	$y = 0,628x + 1,626$ $R^2 = 0,975$	$y = 0,633x + 1,969$ $R^2 = 0,975$
10 °C	$y = 0,639x + 1,558$ $R^2 = 0,995$	$y = 0,609x + 1,863$ $R^2 = 0,957$
15 °C	$y = 0,642x + 1,657$ $R^2 = 0,930$	$y = 0,869x + 1,014$ $R^2 = 0,749$
20 °C	$y = 0,797x + 0,959$ $R^2 = 0,960$	$y = 0,795x + 1,243$ $R^2 = 0,874$
25 °C	$y = 0,821x + 0,908$ $R^2 = 0,941$	$y = 0,796x + 1,064$ $R^2 = 0,822$

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

<b>TÍTULO</b>	“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE PULPAS DE FRUTAS Y PRODUCTOS DERIVADOS EN UNA PLANTA PROCESADORA DE JUGOS”
<b>SUBTÍTULO</b>	

### AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>TOVAR, ELIZBETH M.</b>	CVLAC: 17.242.937 E MAIL: elisbeth_2@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

### PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

**Reología**

**Viscosidad**

**Néctares**

**Jugos**

**Viscosímetro**

**Brookfield**

**Temperatura**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÀREA	SUBÀREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADA	INGENIERÍA QUÍMICA

**RESUMEN (ABSTRACT):**

Se presenta un estudio enfocado a evaluar las propiedades reológicas de pulpas de frutas y productos derivados en una planta industrial productora de jugos y néctares, a los fines de mejorar el control de calidad de dichos productos (identificados desde A hasta E). Los resultados revelaron que la viscosimetría copas Ford es más apta para fluidos con comportamiento Newtoniano, y que la metodología Brookfield se aplica a fluidos Newtonianos y no-Newtonianos. Los resultados obtenidos con la Copa Ford N° 2 fueron más confiables que con la Copa Ford N° 4. También se concluyó que la viscosidad para los jugos y néctares disminuye con el aumento de la temperatura. Entre 0 y 25 °C las pulpas estudiadas exhibieron comportamiento reológico no-Newtoniano tipo plástico de Bingham, y se ajustaron según el modelo de Heschel-Bulkley. En el rango de temperatura estudiado, el índice de comportamiento de flujo de la pulpa A fue máximo y el de la pulpa C ligeramente superior a los de las pulpas B, D y E. Las dependencias del índice de consistencia y del esfuerzo cedente en función de la temperatura revelaron que al cambiar la temperatura, estos parámetros reológicos se pueden modificar más fácilmente en las pulpas C y D, y más difícilmente en la pulpa A.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>LUCAS ÁLVAREZ ASESOR ACADÉMICO</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS(x)</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>4.077.552</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>lalvarezm57@gmail.com</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>AMARILLYS ALDANA ASESOR INDUSTRIAL</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU(x)</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>11.165.943</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>amarillys.aldana@empresas-polar.com</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>HERNAN RAVEN JURADO PRINCIPAL</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU(x)</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>4.136.007</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>hraven@yahoo.com</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>ANA CIARFELLA JURADO PRINCIPAL</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU(x)</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>8.315.404</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>atciarfella@gmail.com</b>			
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2010</b>	<b>04</b>	<b>15</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S)**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS.Evaluación de las propiedades reológicas” .doc	Aplication/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L  
M N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5  
6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** Dep. Desarrollo/Empresas Polar (Caracas) **(OPCIONAL)**

**TEMPORAL:** seis (6) meses **(OPCIONAL)**

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero químico

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pre-grado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería química

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado

“Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo Universitario”

TOVAR, ELIZBETH M.

**AUTOR**

ÁLVAREZ, LUCAS

**TUTOR**

RAVEN, HERNÁN

**JURADO**

CIARFELLA, ANA

**JURADO**

SALAS YRAIMA

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**