

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Uso de *Moringa oleifera* Lam. para el desarrollo de productos alimenticios a base de cereales: Aplicación de transporte de momento y reología

Proyecto de Investigación y Desarrollo

Renata Dominique Paz Zumárraga

Ingeniería Química

Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del título de Ingeniera Química

Quito, 21 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Uso de *Moringa oleifera* Lam. para el desarrollo de productos alimenticios a base de cereales: Aplicación de transporte de momento y reología

**Renata Dominique Paz Zumárraga**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Andrea Landázuri, Ph.D.

Gabriela Vernaza, Ph.D.

Firma del profesor

---

Firma del profesor

---

Quito, 21 de diciembre de 2017

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Renata Dominique Paz Zumárraga

Código: 00112295

Cédula de Identidad: 171731238-1

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre de 2017

## Resumen

Dentro de los Fenómenos de Transporte de Momento, uno de los intereses es el comportamiento de fluidos no newtonianos. La importancia de este proyecto radica en el estudio de la viscosidad en función de la concentración y esfuerzos cortantes de diferentes formulaciones a base de cereal con semillas de *Moringa oleifera* Lam. sin contenido de aceite y grasa. Con ello se podrá comprobar las características de estas formulaciones aparentemente no newtonianas y los parámetros influyentes para su comportamiento; así como también, optimizar los procesos de transporte del mismo como, por ejemplo, su flujo a través de una tubería. Las funciones de viscosidad permitirán la estandarización de las diferentes formulaciones con relación a la cantidad de *Moringa oleifera* Lam. presente en la muestra. En base a las pruebas reológicas realizadas al fluido se determinó que este tiene un comportamiento que se rige por el modelo matemático de ley de potencia  $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ , con un exponente menor a 1, lo que confirma que el fluido sigue un comportamiento pseudo-plástico. Para las formulaciones de 0%, 1%, 3%, 5%, 7% y 9% de contenido de *Moringa oleifera* Lam. los valores del exponente “n” fueron  $0.495\pm 0.020$ ,  $0.434\pm 0.018$ ,  $0.4626\pm 0.01$ ,  $0.346\pm 0.014$ ,  $0.460\pm 0.017$ ,  $0.507\pm 0.022$ , respectivamente. Por otro lado, se realizaron pruebas de contenido de Na, Ca, Fe, proteína y grasa para determinar el contenido nutricional y diferenciar cambios debidos a la sustitución de harina de trigo por *Moringa oleifera* Lam. en las formulaciones.

Palabras clave: *Moringa oleifera* Lam., viscosidad, esfuerzo cortante, fluido no newtoniano, pseudo-plástico.

## Abstract

One of the interests within Momentum Transport Phenomena is Non-Newtonian fluids behavior. The importance of this project lies in the study of viscosity as a function of concentration and shear stress of different cereal based formulations containing *Moringa oleifera* Lam. seeds without fat and oil content. This allows the verification of the characteristics of these apparently Non-Newtonian formulations and the influence in their behavior, as well as the optimization of their transport processes (such as their flow in a pipeline). The viscosity functions will allow the standardization of the different formulations in relation to the amount of *Moringa oleifera* Lam. present in the sample. Based on the rheological tests performed on the fluid, it was determined that its behavior is governed by the Power Law model  $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ , where its exponent is less than 1, which confirms that the fluid follows a pseudo-plastic behavior. For the 0%, 1%, 3%, 5%, 7% and 9% *Moringa oleifera* Lam. formulations, the values for the exponent “*n*” were  $0.495 \pm 0.020$ ,  $0.434 \pm 0.018$ ,  $0.4626 \pm 0.01$ ,  $0.346 \pm 0.014$ ,  $0.460 \pm 0.017$ ,  $0.507 \pm 0.022$ , respectively. In addition, Na, Ca, Fe, protein and fat content tests were performed, to determine the nutritional content and differentiate changes due to the substitution of wheat flour by *Moringa oleifera* Lam.

Key words: *Moringa oleifera* Lam., viscosity, shear stress, Non-Newtonian fluid, pseudo-plastic

## Índice de Contenido

1.	Introducción.....	11
1.1.	Ley de Viscosidad de Newton.....	13
1.2.	Fluidos No – Newtonianos.....	16
1.2.1.	Clasificación según su variación con la velocidad de cizalladura .....	16
1.2.2.	Clasificación según la variación en el tiempo.....	18
1.3.	Modelos Matemáticos .....	19
2.	Metodología.....	21
2.1.	Preparación de Formulaciones de la masa reológica.....	21
2.2.	Análisis reológico.....	22
2.2.1.	Husos Cilíndricos.....	22
2.3.	Simulación del fluido en un segmento de tubería .....	24
2.4.	Análisis de contenido de Na, Ca y Fe .....	26
2.4.1.	Digestión de muestras .....	26
2.4.2.	Medición de elementos mediante Espectrometría de Absorción Atómica .....	26
2.5.	Determinación de porcentaje de proteína.....	30
2.5.1.	Digestión .....	30
2.5.2.	Destilación .....	31
2.5.3.	Titulación .....	31
2.6.	Determinación de porcentaje de grasa.....	31
3.	Resultados y discusiones .....	32
3.1.	Obtención de perfiles de viscosidad.....	32
3.2.	Simulación de segmento de tubería.....	36
3.3.	Contenido de Na, Ca y Fe .....	37
3.4.	Contenido de Proteína .....	43
3.5.	Contenido de Grasa .....	45
4.	Conclusiones.....	45

5. Agradecimientos .....	49
6. Dedicatoria.....	50
7. Referencias bibliográficas .....	51
8. Anexos .....	54

## Índice de Figuras

Figura 1. Características de Moringa oleifera Lam. planta multivitamínica. Fuente: Ecuamoringa .	11
Figura 2. Formación de un perfil laminar en un sistema de dos placas que alcanza el estado estacionario. Fuente: R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot (2012) .....	14
Figura 3. Comportamiento de un fluido Pseudo-plástico. ....	17
Figura 4. Comportamiento de un fluido dilatante. ....	18
Figura 5. Comportamiento de un fluido plástico. ....	18
Figura 6. Comportamiento de un fluido de tixotropía. ....	19
Figura 7. Comportamiento de un fluido de reopexia. ....	19
Figura 8. Husos cilíndricos de reómetro Brookfield DV-III Ultra. ....	22
Figura 9. Curva de estabilización de la viscosidad para el reómetro Brookfield DV-III Ultra a 20.1°C .....	23
Figura 10. Funcionamiento interno de Espectrómetro de absorción atómica. Fuente: Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry (1982) .....	27
Figura 11. Curva de calibración para sodio (Na).....	28
Figura 12. Curva de calibración para calcio (Ca) .....	29
Figura 13. Curva de calibración para hierro (Fe).....	29
Figura 14. Perfiles de viscosidad absoluta para diferentes formulaciones con respecto a la velocidad de cizalladura .....	32
Figura 15. Ley de Potencia a) Formulación 0% MO, b) Formulación 1% MO, c) Formulación 3% MO, d) Formulación 5% MO, e) Formulación 7% MO, f) Formulación 9% MO. ....	35
Figura 16. Perfiles de velocidad a lo largo de una tubería: a) formulación 0% MO b) formulación 1% MO c) formulación 3% MO d) formulación 5% e) formulación 7% f) formulación 9%.....	36
Figura 17. Comparación entre moringa oleífera y harina fortificada .....	38
Figura 18. Concentración de minerales en cada una de las formulaciones.....	39
Figura 19. Concentración de sodio en cada una de las formulaciones .....	40
Figura 20. Concentración de calcio en cada una de las formulaciones.....	40
Figura 21. Concentración de hierro en cada una de las formulaciones.....	41
Figura 22. Contenido de proteína de las diferentes formulaciones.....	44
Figura 23. Ley de Casson a) Formulación 0% MO, b) Formulación 1% MO, c) Formulación 3% MO, d) Formulación 5% MO, e) Formulación 7% MO, f) Formulación 9% MO. ....	69



Figura 24. Ley de Herschel Bulkley a) Formulaci3n 0% MO, b) Formulaci3n 1% MO, c) Formulaci3n 3% MO, d) Formulaci3n 5% MO, e) Formulaci3n 7% MO, f) Formulaci3n 9% MO. ....	70
Figura 25. Ley de Carreau a) Formulaci3n 0% MO, b) Formulaci3n 1% MO, c) Formulaci3n 3% MO, d) Formulaci3n 5% MO, e) Formulaci3n 7% MO, f) Formulaci3n 9% MO. ....	71
Figura 26. Ley de Bingham a) Formulaci3n 0% MO, b) Formulaci3n 1% MO, c) Formulaci3n 3% MO, d) Formulaci3n 5% MO, e) Formulaci3n 7% MO, f) Formulaci3n 9% MO. ....	72

## Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación harina de trigo y harina de Moringa Oleifera Lam. Fuente: Chinma C.E. et al. (2013).....	12
Tabla 2. Datos para elaboración de las distintas formulaciones .....	21
Tabla 3. Valores experimentales de densidad.....	24
Tabla 4. Modelos matemáticos y sus respectivos ajustes .....	34
Tabla 5. Velocidad y presión máxima para cada una de las formulaciones .....	37
Tabla 6. Concentración de Na, Ca y Fe en diferentes formulaciones de masa reológica, harina y Moringa oleifera Lam. ....	38
Tabla 7. Análisis de la varianza para contenido de hierro .....	42
Tabla 8. Análisis de la varianza para contenido de calcio .....	42
Tabla 9. Análisis de la varianza para contenido de sodio .....	43
Tabla 10. Porcentaje de proteína presente en cada formulación, harina y Moringa oleifera Lam. ...	43
Tabla 11. Análisis de varianza para contenido de proteína.....	44
Tabla 12. Porcentaje de grasa en formulaciones 0% y 9% .....	45
Tabla 13. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 0% MO.....	54
Tabla 14. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 1% MO.....	57
Tabla 15. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 3% MO.....	60
Tabla 16. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 5% MO.....	63
Tabla 17. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 7% MO.....	65
Tabla 18. Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 9% MO.....	67
Tabla 19. Contenido de Fe, Ca y Na para cada una de las formulaciones.....	73

## 1. Introducción

La *Moringa oleifera* Lam. es un cultivo originario del norte de la India, es la especie más conocida de la familia Moringaceae. Actualmente también se cultiva en Asia, América, África y en algunas partes de Europa (Foidl et al. 2001). Esta planta es propia de tierras bajas y zonas cálidas, pero tolera un gran rango de condiciones climáticas y de suelo (Buchelli, 2015), por esta razón en Ecuador su crecimiento es favorable en la región costa del país. Su cultivo en territorio ecuatoriano en la actualidad abarca zonas como Santa Elena, Portoviejo, Salitre, Naranjito y Guayaquil. Tiene una gran adaptabilidad, ya que se ha evidenciado su crecimiento en suelos húmedos, secos, áridos y pesados. Con condiciones óptimas de humedad y nutrientes puede alcanzar los 3[m] de altura en su primer año de vida.

Sus capacidades medicinales y nutricionales le han otorgado el nombre de “El árbol milagroso”. Estudios han demostrado que el contenido nutricional es alto en vitamina C, vitamina A, vitaminas del grupo B, potasio, hierro, calcio, fósforo, magnesio, zinc, entre otros minerales.



**Figura 1.** Características de *Moringa oleifera* Lam. planta multivitamínica. Fuente: Ecuamoringa

Esto ha motivado la exploración de nuevas alternativas para su incorporación en productos alimenticios ya que según estudios realizados la harina de semilla de moringa tiene un mayor contenido de proteína, grasa, hierro y calcio que la harina de trigo:

**Tabla 1.** Comparación harina de trigo y harina de *Moringa Oleifera* Lam. Fuente: Chinma C.E. et al. (2013).

<b>Componente</b>	<b>Harina de Trigo [g/100g]</b>	<b>Harina de Semilla de Moringa Oleifera [g/100g]</b>
Proteína	10.68 ± 0.25	38.29 ± 0.81
Cenizas Totales	0.54 ± 0.06	4.11 ± 0.17
Grasas	1.13 ± 0.07	6.87 ± 0.42
Fibra Cruda	0.69 ± 0.04	3.16 ± 0.15
Hierro	1.95 ± 0.03	3.02 ± 0.11
Calcio	38.29 ± 0.52	175.45 ± 0.63

Las semillas de *Moringa oleifera* Lam. se encuentran dentro de vainas que pueden medir de 20 hasta 60 [cm] de longitud y cuelgan de las ramas del árbol. Dentro de cada vaina se pueden tener de 12 a 35 semillas, cuyo peso es cerca de 0.3 [g] cada una (Foidl et al. 2001). Foid, Makkar y Becker en su estudio “The Potential of *Moringa oleifera* for Agricultural and Industrial uses” establecen que las semillas de moringa contienen beta-caroteno, luteína, ácidos grasos insaturados y altos niveles de ácido oleico, los cuales son compuestos de gran beneficio para la salud. El beta-caroteno es un tipo de pigmento que es fuente de vitamina A presente en las frutas, vegetales y granos que ayuda a prevenir el cáncer, enfermedades cardiovasculares, cataratas, entre otras enfermedades (Christen & Michael Gaziano, 2000). Por otra parte, la luteína es un pigmento liposoluble presente en plantas, algas y el huevo cuya función es antioxidante, reduce la degeneración de los ojos y les protege de la luz ultravioleta (Granado et al. 2003).

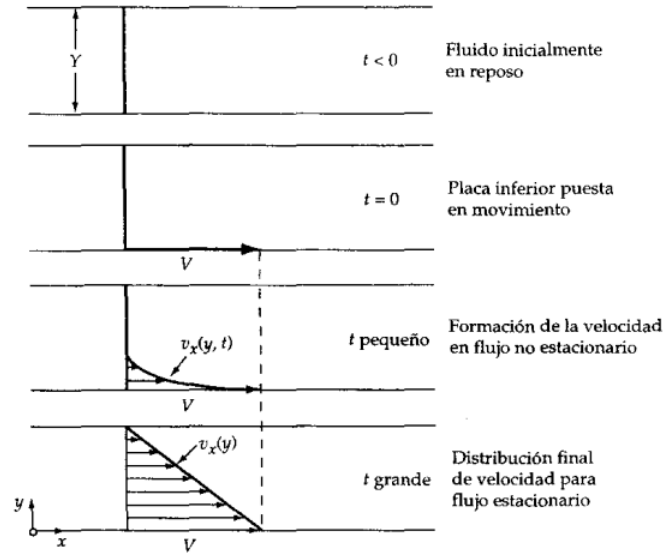
Tomando en cuenta los beneficios nutricionales de la *Moringa oleifera* Lam. es de gran importancia el agregar esta planta a los alimentos para enriquecerlos. De acuerdo a algunos estudios, se ha incorporado tanto las hojas de esta planta como sus semillas a productos como pan, galletas y purés (Ogunsina et al. 2011) (El-Gammal et al. 2016) (Dachana et al. 2010) (Meher et al. 2017), para analizar su contenido nutricional y también el comportamiento reológico de las masas.

La reología es la ciencia que no solamente estudia el flujo y deformación de la materia, sino también las propiedades que la definen. Esta ciencia trata con fluidos cuyas propiedades no son descritas por los modelos lineales de Newton, Stokes y Hooke, en otras palabras, la reología estudia las propiedades de los materiales cuyos comportamientos están descritos por cualquier relación no lineal entre fuerza y deformación (Malkin & Isayev, 2005). Una rama dentro de la reología es la reometría la misma que permite la determinación experimental del comportamiento del flujo de un fluido mediante el análisis de sus propiedades visco-elásticas; estas propiedades son la viscosidad, elasticidad y relajación (Rojas, 2012).

La viscosidad es la propiedad de resistencia de los fluidos al movimiento y a la deformación (Ortíz, 2006). Puede ser también considerada como una fuerza de arrastre y es una medida de las propiedades de fricción de un fluido. Puede ser expresada como viscosidad absoluta o dinámica y como viscosidad cinemática (Viswanath et al. 2007). La viscosidad dinámica es descrita por Newton y explica el comportamiento de la viscosidad en los fluidos.

### **1.1. Ley de Viscosidad de Newton**

La ecuación de viscosidad de Newton parte de un análisis de placas paralelas separadas una distancia “Y” entre las cuales se encuentra un fluido. Es importante establecer que sólo una de las placas se pone en movimiento en un tiempo  $t=0$ . La transición de este movimiento se refleja en la siguiente figura:



**Figura 2.** Formación de un perfil laminar en un sistema de dos placas que alcanza el estado estacionario. Fuente: R. Bird, W. Stewart, E. Lightfoot (2012)

Para el movimiento de la placa inferior se requiere de una fuerza constante “ $F$ ”, que mueve una placa de área “ $A$ ” a velocidad constante “ $V$ ”. Esta fuerza puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (1)$$

Donde “ $\mu$ ” es la constante de proporcionalidad de la ecuación ( 1 ) y representa la viscosidad dinámica del fluido en el interior de las placas (Bird et al. 2012). Reemplazando los términos de esta ecuación por otra nomenclatura:

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

La ecuación ( 2 ) es la Ley de Viscosidad de Newton en la que la fuerza cortante “ $\tau_{xy}$ ” es proporcional al negativo del gradiente de velocidad. Se denomina fuerza cortante puesto que es la fuerza en dirección del fluido, en este caso “ $x$ ”, sobre un área unitaria perpendicular en este caso “ $y$ ”. Esta ecuación es válida para un sistema simple de flujo cortante en estado estacionario, para el cual las velocidades tanto en el eje “ $z$ ” como en el eje “ $y$ ” son nulas. Pero en la realidad se tiene un flujo en

el que importan las tres componentes de la velocidad ya que pueden depender también del tiempo de la siguiente manera:

$$v_x = v_x(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$v_y = v_y(x, y, z, t) \quad (4)$$

$$v_z = v_z(x, y, z, t) \quad (5)$$

Por lo que la generalización de la Ley de Viscosidad de Newton de acuerdo a Byrd, Stewart y Lightfoot de la ecuación (2) es:

$$\tau_{ij} = -\mu \left( \frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \left( \frac{2}{3}\mu - \kappa \right) \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de viscosidad dinámica

$\kappa$  = Coeficiente de viscosidad de dilatación

$\delta$  = Tensor unitario

La viscosidad cinemática es determinada a condiciones de presión y temperatura específicos ya que se requiere conocimiento de la densidad del fluido (Viswanath et al. 2007) y se calcula de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Donde:

$\nu$  = Viscosidad cinemática

$\mu$  = Viscosidad dinámica

$\rho$  = Densidad

Un fluido es un medio continuo formado por una sustancia, líquida o gaseosa, cuyas moléculas tienen fuerzas de cohesión débiles (González, 2016). Los fluidos pueden clasificarse en newtonianos y no newtonianos. Los fluidos no newtonianos son aquellos cuya viscosidad es variable en función de un estrés o fuerza aplicada (Irgens, 2013). Por esta razón no se puede definir un coeficiente constante para la viscosidad de estos fluidos.

## **1.2. Fluidos No – Newtonianos**

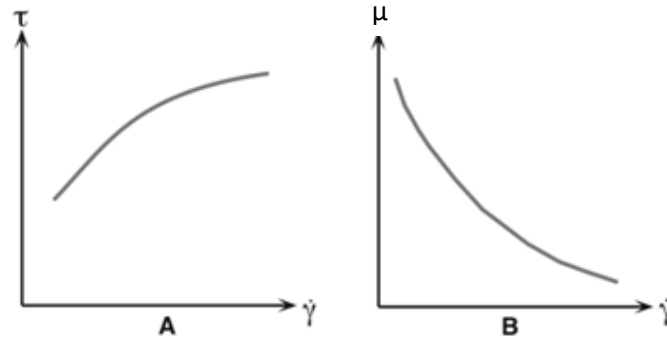
Los fluidos no newtonianos son aquellos cuyo comportamiento no está regido por las ecuaciones ( 2 ) y ( 6). Su característica principal es que su viscosidad no permanece constante a diferencia de los fluidos newtonianos, esto implica que la razón entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalladura del fluido es una función que puede depender de variables como la temperatura y el tiempo (Bird et al. 2012). Es importante saber que la velocidad de cizalladura es la derivada de la deformación transversal del fluido en el tiempo. Los fluidos no newtonianos se pueden clasificar de acuerdo a la variación de la viscosidad con respecto a la variación de la velocidad de corte o también con respecto a la variación del tiempo.

### **1.2.1. Clasificación según su variación con la velocidad de cizalladura**

#### *1.2.1.1. Pseudo-plásticos*

Un fluido no newtoniano pseudo-plástico es aquel cuya viscosidad disminuye con un aumento en la velocidad de corte (Viswanath et al. 2007). Ejemplos de este tipo de fluidos son las pinturas, emulsiones y dispersiones de varios tipos. El comportamiento que tienen estos fluidos es denominado “adelgazamiento por cizalladura” ya que al aumentar la velocidad de corte en el fluido la estructura molecular del fluido cambia y su estructura se destruye, por esta razón una menor cantidad de moléculas en la estructura se deslizarán juntas y su viscosidad será menor.





**Figura 3.** Comportamiento de un fluido Pseudo-plástico.

Fuente: Brookfield Engineering Labs, 2003.

Donde:

$\tau$  = Estrés cortante

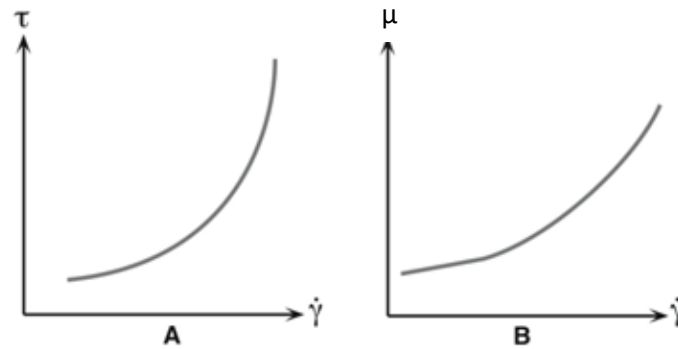
$\dot{\gamma}$  = Velocidad de cizalladura

$\mu$  = Viscosidad dinámica

La velocidad de cizalladura es la velocidad de deformación del fluido debido a una fuerza ejercida sobre él (Rojas, 1999).

#### 1.2.1.2. *Dilatantes*

Un fluido no newtoniano dilatante es aquel que presenta un aumento en la viscosidad frente a un aumento en la velocidad de corte (Viswanath et al. 2007). Ejemplos de este tipo de fluidos son las lechadas de arcilla, caramelos, maicena en agua y mezclas de arena en agua.

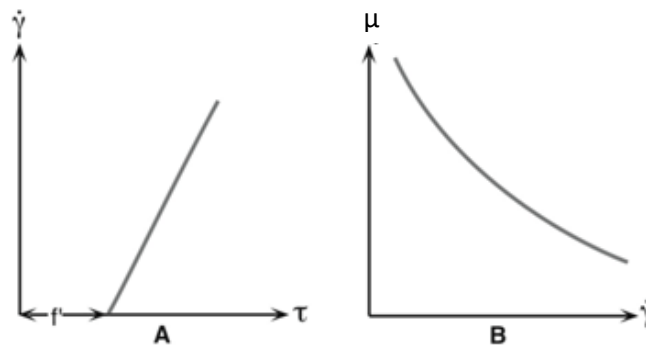


**Figura 4.** Comportamiento de un fluido dilatante.

Fuente: Brookfield Engineering Labs, 2003.

### 1.2.1.3. Plásticos

Un fluido no newtoniano plástico es aquel que se comporta como un sólido en condiciones estáticas. Para que el fluido fluya se le debe proporcionar una fuerza que lo obligue a cambiar el estado de reposo, a esta fuerza se le denomina fuerza de rendimiento (Viswanath et al. 2007). Un ejemplo de este tipo de fluidos es la salsa de tomate.



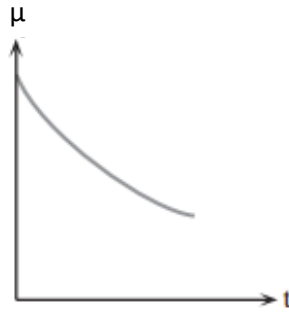
**Figura 5.** Comportamiento de un fluido plástico.

Fuente: Brookfield Engineering Labs. 2003.

## 1.2.2. Clasificación según la variación en el tiempo

### 1.2.2.1. Tixotropía

Este tipo de fluidos presentan un decremento en la viscosidad con el paso del tiempo, a una velocidad de corte constante (Viswanath et al. 2007).

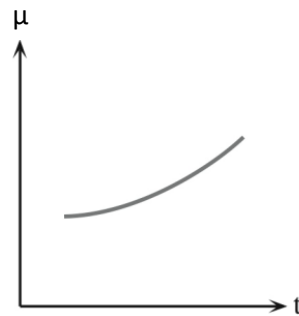


**Figura 6.** Comportamiento de un fluido de tixotropía.

Fuente: Brookfield Engineering Labs. 2003.

#### 1.2.2.2. *Reopexia*

Este tipo de fluidos presenta un comportamiento opuesto al de tixotropía, ya que la viscosidad del fluido con el paso del tiempo incrementa a una velocidad de corte constante (Viswanath et al. 2007).



**Figura 7.** Comportamiento de un fluido de reopexia.

Fuente: Brookfield Engineering Labs. 2003.

Para caracterizar un fluido no newtoniano es importante analizar la viscosidad, los estreses normales, y las propiedades visco elásticas del fluido.

### 1.3. Modelos Matemáticos

Cuando se trabaja con fluidos no newtonianos es preciso determinar su comportamiento en base a modelos matemáticos; los cuales nos permitan comprender su comportamiento. Algunos de los modelos más utilizados se presentan a continuación:

**Bingham**

$$\tau = \tau_0 + \mu D \quad (8)$$

**Casson**

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu D} \quad (9)$$

**Ley de Potencia**

$$\tau = \kappa \dot{\gamma}^n \quad (10)$$

**Herschel Bulkley**

$$\tau = \tau_0 + \kappa \dot{\gamma}^n \quad (11)$$

**Carreau**

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (12)$$

Donde:

$\tau$  = Estrés Cortante

$\dot{\gamma}$  = Velocidad Cortante

$\mu$  = Viscosidad dinámica

$\mu_\infty$  y  $\mu_0$  = Viscosidad en estado estacionario e inicial, respectivamente

$\tau_0$  = Estrés de rendimiento

$\kappa$  = Índice de consistencia

$n$  = Índice de flujo

El objetivo principal de este estudio consiste en determinar el comportamiento reológico de formulaciones a base de cereales con semillas de *Moringa oleifera* Lam. sin contenido de aceite y grasa. De manera específica se desea i) realizar diferentes formulaciones a base de cereales con semillas de *Moringa oleifera* Lam. variando composiciones de 0 al 9%. ii) Analizar en el reómetro la

variación de viscosidad de las distintas muestras. iii) Determinar un modelo de viscosidad a estrés variable. iv) Analizar los resultados obtenidos. v) Modelar el perfil de velocidad del fluido incorporando funciones de viscosidad. vi) Determinar características nutricionales del fluido.

## 2. Metodología

### 2.1. Preparación de Formulaciones de la masa reológica

La pasta de semillas de *Moringa oleifera* Lam. fue obtenida de Ecuamoringa, Ecuador. Para homogenizar el tamaño de partícula de la pasta, se realizó una reducción de tamaño de partícula con el molino de marca Bel-Art™ Scienceware™ Micro-Mill™ Grinder y posteriormente un tamizado con el tamiz de marca Market grade Sieve con número de malla 40, 20, 10 hasta obtener partículas menores a 850 [µm]. A continuación, se realizaron diferentes formulaciones de la masa reológica con sustitución de *Moringa oleifera* Lam a distintos porcentajes (0%, 1%, 3%, 5%, 7%, 9%).

**Tabla 2.** Datos para elaboración de las distintas formulaciones

Ingredientes	Formulaciones [g]					
	0%	1%	3%	5%	7%	9%
Harina	390	386	378	370	363	355
Leche	193	193	193	193	193	193
Mantequilla	127	127	127	127	127	127
Vainilla	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
Huevos	212	212	212	212	212	212
Azúcar	166	166	166	166	166	166
Polvo de Hornear	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
Mora	100	100	100	100	100	100
Moringa	0	4	12	20	27	35

## 2.2. Análisis reológico

Para realizar el análisis reológico se empleó el Reómetro Brookfield DV-III Ultra. Antes de iniciar se verificó que el nivel ojo de buey ubicado en la parte superior del reómetro se encuentre centrado, se encendió el equipo y se presionó la tecla “Motor On/Off” para llevar a cero el equipo. La selección del huso cilíndrico a utilizar para los experimentos, dependió del tipo de fluido considerando que la relación entre diámetro de cilindro y viscosidad del fluido es inversamente proporcional, por lo que para los análisis se empleó el huso cilíndrico número 64 (primer huso ubicado a la izquierda de la Figura 8. Husos cilíndricos de reómetro Brookfield DV-III Ultra



**Figura 8.** Husos cilíndricos de reómetro Brookfield DV-III Ultra.

### 2.2.1. Husos Cilíndricos

Las ecuaciones presentadas a continuación se aplican únicamente a husos del Viscosímetro/Reómetro Brookfield (Brookfield Engineering Lbs., 2003).

#### *Estrés de Cizalla*

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)} \text{ [sec}^{-1}\text{]} \quad (13)$$

#### *Esfuerzo Cortante*

$$\tau = \frac{M}{2 \pi R_b^2 L} \text{ [dina/cm}^2\text{]} \quad (14)$$

### Viscosidad

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ [poise]} \quad (15)$$

Donde

$\omega$  = Velocidad angular del huso  $\left[ \left( \frac{2\pi}{60} \right) N \right]$ ,  $N$  = Número de revoluciones por minuto

$R_C$  = Radio del contenedor [cm]

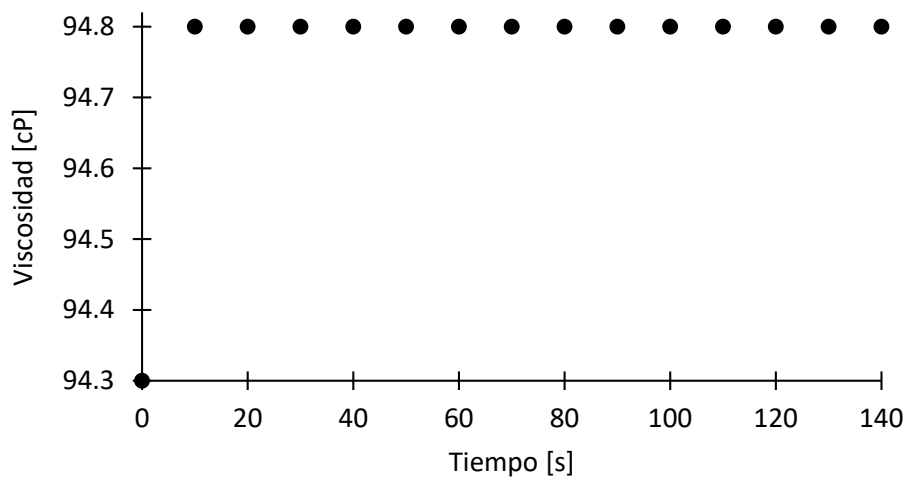
$R_b$  = Radio del huso [cm]

$X$  = radio al cual el estrés cortante es calculado [cm]

$M$  = Torque del instrumento [dina – cm]

$L$  = Longitud efectiva del huso [cm]

Antes de iniciar se realizó una estabilización del equipo empleando el estándar proporcionado por el equipo de donde se obtuvo la siguiente curva de estabilización:



**Figura 9.** Curva de estabilización de la viscosidad para el reómetro Brookfield DV-III Ultra a 20.1°C

Se verificó que el torque ejercido por el fluido en el aspa esté en un rango de 10 a 100% para que las mediciones sean correctas. Se colocó la muestra en un vaso de precipitación de 600 [mL]. Los valores de viscosidad y torque se tomaron en intervalos de 10 segundos cambiando la velocidad del aspa en pasos de 1 cada 10 segundos.

Una vez obtenidos los datos experimentales y los valores calculados en base a las ecuaciones (13), (14) y (15), se utilizó MATLAB para encontrar el mejor modelo matemático que define el comportamiento del fluido.

### 2.3. Simulación del fluido en un segmento de tubería

Se simuló el flujo de los diferentes fluidos obtenidos a partir de las seis formulaciones utilizando la herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), para ello se utilizó el programa COMSOL Multiphysics. El primer paso de la simulación fue la construcción de la geometría, la misma que fue un cilindro de 2 [in] de diámetro o 50.8[mm] y de un largo de 100 [mm]. A continuación, se definió los parámetros para cada fluido, y la Tabla 3. Valores experimentales de densidad refleja los valores empleados para la simulación:

**Tabla 3.** Valores experimentales de densidad

Formulación	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
0%	1275
1%	1355
3%	1440
5%	1530
7%	1660
9%	1715

Adicionalmente, se definió los coeficientes de consistencia del fluido ( $\kappa$ ), el índice de comportamiento del fluido ( $n$ ) y el límite inferior de velocidad de cizalla, respectivamente con los valores que se presentarán posteriormente en la



Tabla 4. A continuación, las ecuaciones que se resolvió en la simulación:

$$\mu = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (16)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + F \quad (17)$$

Donde (16) es la ecuación de Ley de potencia y (17) es la ecuación de Navier-Stokes para un fluido incompresible:

$\rho$  = Densidad

$u$  = Velocidad

$p$  = Presión

$\mu$  = Viscosidad dinámica

$F$  = Fuerza externa

Se definió como condición de entrada una velocidad de entrada de 1 [m/s] y como condición de salida se definió una velocidad normal de salida. Las ecuaciones que describieron la entrada y la salida de la tubería, respectivamente, fueron:

$$u = -u_0 n \quad (18)$$

$$u = u_0 n \quad (19)$$

Donde:

$u$  = Velocidad

$u_0$  = Velocidad Inicial

$n$  = Matriz de vector normal

Las condiciones de borde en la tubería están dadas por la condición de “no slip” para lo que la ecuación en las paredes es la siguiente:

$$u = 0 \quad (20)$$

## 2.4. Análisis de contenido de Na, Ca y Fe

### 2.4.1. Digestión de muestras

Se pesó 2 [g] de muestra, se preparó una solución 1:1 de ácido nítrico HNO<sub>3</sub> y agua tipo I. En un vaso de precipitación se colocó la muestra con 20 [mL] de la solución 1:1. Se llevó la solución resultante a una estufa a 70 [°C] por un período de 30 [min]. Una vez terminados los 30 [min] se enfrió la muestra. Se añadió 5 [mL] de HNO<sub>3</sub> al 69%. Se colocó nuevamente en la estufa a 70 [°C] por un período de 30 [min]. Se dejó enfriar la muestra y se agregó 5 [mL] de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98%. Se colocó en la estufa a 70 [°C] por un período de 20 [min]. Se dejó enfriar completamente la muestra y se procedió a filtrar. Se colocó la solución filtrada en un balón de 50 [mL] y se aforó con una solución de HNO<sub>3</sub> al 3% v/v con agua tipo I. Se procedió a realizar mediciones en el equipo de absorción atómica, verificando que las muestras no estén muy concentradas o diluidas dependiendo del caso.

### 2.4.2. Medición de elementos mediante Espectrometría de Absorción Atómica

La espectrofotometría de absorción atómica es una técnica analítica que mide la concentración de algunos elementos metálicos en diferentes muestras y está basada en la Ley de Beer-Lambert. Dicha ley establece que la cantidad de luz absorbida por un elemento cuerpo depende de la concentración de un elemento en solución y del grosor del medio homogéneo por el que esta pasa.

$$A = abc \quad (21)$$

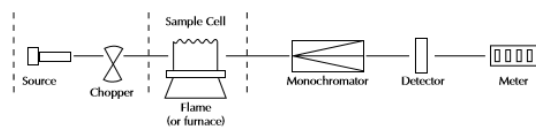
La ecuación ( 21) es la ecuación simplificada de Beer-Lambert donde:

A = Absorbancia

$a$  = factor de calibración

$c$  = concentración

Esta técnica posee una sensibilidad que permite determinar hasta partes por billón en un gramo de muestra (Dale, 1982). El uso de longitudes de onda de luz absorbida por un elemento es muy importante en esta técnica ya que corresponden a la energía necesaria para llevar un electrón de un nivel de energía a otro nivel de energía mayor. Cada elemento absorbe una longitud característica del mismo. Para realizar EAA se emplea una lámpara de cátodo hueco, la misma que contiene un cátodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico hueco que contiene el elemento a ser determinado. Estos están sellados en un tubo de vidrio lleno de gas inerte que puede ser neón o argón. Es necesario la aplicación de una diferencia de potencial de aproximadamente 300 a 400 V entre el ánodo y el cátodo para generar la ionización de algunos átomos de gas. Estos iones bombardean el cátodo liberando átomos del metal en cuestión, a esto se le denomina como pulverización catódica. Algunos de estos átomos se encuentran en estados excitados lo que genera una emisión de radiación que es característica del metal cuando bajan a su estado fundamental. La radiación es concentrada en un haz gracias a la forma del cátodo, está pasa a través de una ventana de cuarzo, la mayoría de los átomos vuelven a depositarse nuevamente en el cátodo (Dale, 1982).



**Figura 10.** Funcionamiento interno de Espectrómetro de absorción atómica. Fuente:

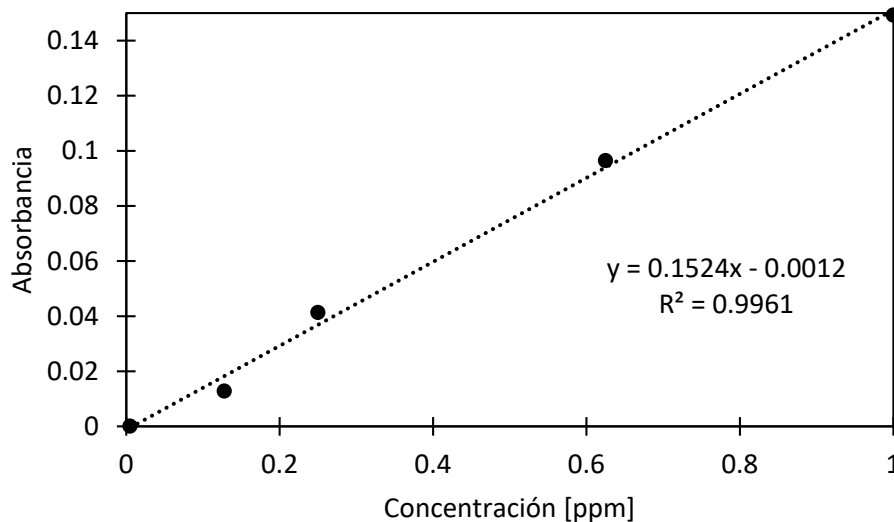
Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry (1982)

El monocromador permite la detección de solamente una longitud de onda, que como ya se mencionó es específica para cada elemento metálico que se va a analizar.

Para el análisis de metales como Na, Ca y Fe se empleó el Espectrofotómetro de absorción atómica 205 de marca Buck Scientific. Se realizó una curva de calibración para cada elemento analizado. Empleando 5 soluciones estándares a diferentes concentraciones.

#### 2.4.2.1. Sodio (Na)

Para la curva de calibración de sodio se utilizó soluciones estándares de 1, 0.625, 0.25, 0.1275 y 0.005 [ppm] en balones de aforo de 50 [mL] con una matriz de HNO<sub>3</sub> al 3%. Teniendo en cuenta que la longitud de onda para el sodio es de 589 [Nm] y se empleó una mezcla de aire-acetileno como combustible. La curva de calibración obtenida es la siguiente:

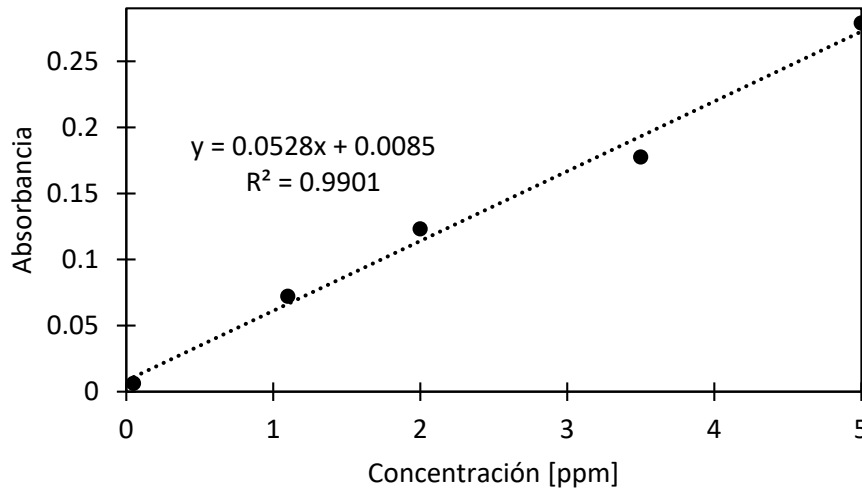


**Figura 11.** Curva de calibración para sodio (Na)

Se procedió a realizar las mediciones para cada una de las muestras por triplicado.

#### 2.4.2.2. Calcio (Ca)

Para la curva de calibración de calcio se utilizó soluciones estándares de 5, 3.5, 2, 1.1 y 0.05 [ppm] en balones de aforo de 50 [mL] con una matriz de HNO<sub>3</sub> al 3%. Teniendo en cuenta que la longitud de onda para el calcio es de 422.7 [Nm] y se empleó una mezcla de aire-acetileno como combustible. La curva de calibración obtenida es la siguiente:

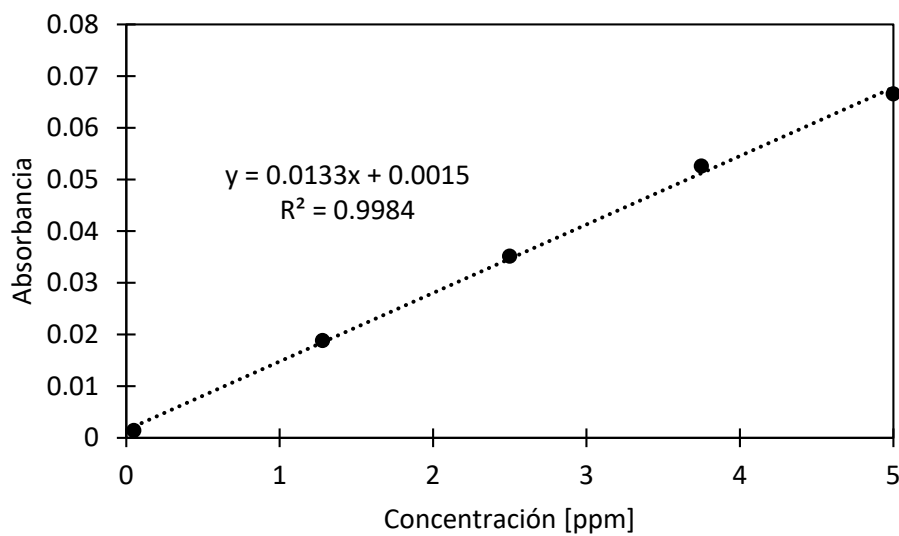


**Figura 12.** Curva de calibración para calcio (Ca)

Se procedió a realizar las mediciones para cada una de las muestras por triplicado.

#### 2.4.2.3. Hierro (Fe)

Para la curva de calibración de hierro se utilizó soluciones estándares de 5, 3.75, 2.5, 1.28 y 0.05 [ppm] en balones de aforo de 50 [mL] con una matriz de HNO<sub>3</sub> al 3%. Teniendo en cuenta que la longitud de onda para el hierro es de 248.3 [Nm] y se empleó una mezcla de aire-acetileno como combustible. La curva de calibración obtenida es la siguiente:

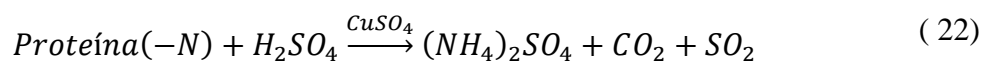


**Figura 13.** Curva de calibración para hierro (Fe)

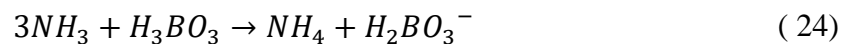
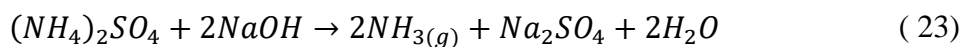
Se procedió a realizar las mediciones para cada una de las muestras por triplicado.

## 2.5. Determinación de porcentaje de proteína

Para la determinación de proteína se utilizó el método de Kjeldahl. Este método para la determinación de nitrógeno es muy utilizado en alimentos, bebidas, carnes, cereales, entre otros para el cálculo de porcentaje de proteína en los mismos. Es muy eficiente para determinar el contenido de nitrógeno tanto en muestras orgánicas como inorgánicas (O'Dell, 1993). El proceso consiste en tres etapas: digestión, destilación y titulación. En el proceso de digestión se lleva a cabo la siguiente reacción:



Para la fase de destilación se añade un exceso de NaOH para neutralizar la solución obtenida después de la digestión. El amonio obtenido se recoge en una solución de ácido bórico. Se lleva a cabo la siguiente reacción:



Finalmente, se titula con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, contenido de nitrógeno es proporcional al contenido de anión borato (O'Dell, 1993).

### 2.5.1. Digestión

Para la digestión se pesó 0.5 [g] de muestra y se envolvió en papel filtro analítico. Se colocó las muestras en cada tubo de Kjeldahl rotulado respectivamente. Se adicionó 12 [mL] de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dos pastillas de catalizador de sulfato de cobre (II) y una pastilla de antiespumante. Se colocan los tubos en el digestor Kjeldahl DK 6 Velp Scientifica por aproximadamente 2 [h]. Las muestras son calentadas a 350 [°C] y permanece en esa temperatura por 30 [min]. Posteriormente se eleva la temperatura a 450[°C] y permanece en esa temperatura por 45 [min]. En este punto el nitrógeno de la muestra se convierte en sulfato de amonio. Se retiró las muestras y se dejó enfriar.

### **2.5.2. Destilación**

Se midió con una pipeta volumétrica 25 [mL] de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  AL 4% en un matraz Erlen Meyer de 250 [mL]. Se colocó el tubo de Kjeldahl y el matraz en el destilador marca Velp Scientifica UDK 149. Se seleccionó la operación “Destilación”, se confirmó el peso de la muestra y se esperó 4 [min] para que finalice el proceso. Este proceso se realiza en presencia de NaOH al 35% para neutralizar la muestra con dosificaciones de 50 [mL] de agua destilada y 50[mL] de NaOH.

### **2.5.3. Titulación**

Para la valoración se empleó ácido clorhídrico (HCl) 0.2 [N] estandarizado e indicador Tashiro. Se colocó en un soporte universal una bureta de 25 [mL]. En la solución obtenida en el matraz Erlen Meyer se colocó 2 gotas de indicador Tashiro, la solución se tornó de color verde, se tituló con HCl hasta obtener un cambio de color a fucsia fuerte.

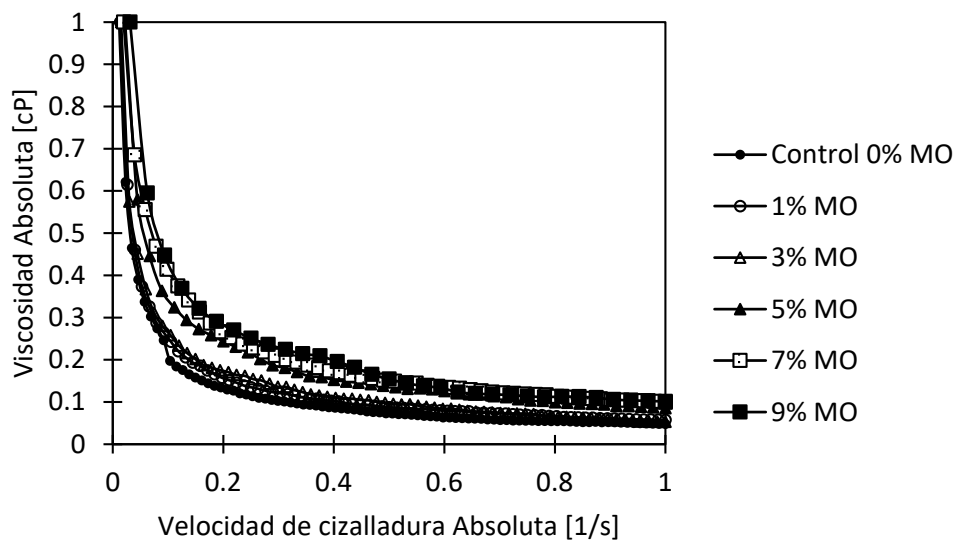
## **2.6. Determinación de porcentaje de grasa**

Para la determinación de porcentaje de grasa se realizó una extracción Soxhlet, para la cual se pesó 2 gramos de muestra y se colocó en un cartucho de alúmina. Se utilizó el extractor Soxhlet SER 148 marca Velp Scientifica para el procedimiento. Se registró el peso inicial de los vasos de precipitación del equipo y se colocó en cada uno de ellos 60 [mL] de hexano. Se ubicaron los cartuchos de alúmina con la muestra en los respectivos lugares al igual que los vasos de precipitación y se inició el equipo en la fase de inmersión durante 1[h]. Posteriormente se pasó a la fase lavado durante 1[h] y finalmente, a la fase de recuperación durante 40 [min]. Se dejó enfriar las muestras, después se las llevó al horno a una temperatura de 30°C para eliminar restos de hexano de la muestra. Por último, se registró los pesos finales de cada uno de los vasos de precipitación y se calculó mediante diferencia de pesos el contenido en grasa de las diferentes muestras.

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1. Obtención de perfiles de viscosidad

Una vez finalizadas las pruebas experimentales en el Reómetro Brookfield DV-III Ultra, se obtuvieron los siguientes resultados para cada una de las formulaciones de las masas reológicas, cabe resaltar que de ahora en adelante se empleará el término MO para hacer referencia a la *Moringa oleifera* Lam.



**Figura 14.** Perfiles de viscosidad absoluta para diferentes formulaciones con respecto a la velocidad de cizalladura

En la Figura 14 se puede observar que existe un aumento en la viscosidad del fluido a medida que la concentración de *Moringa oleifera* Lam. aumentó. Se comprueba que el fluido tiene un comportamiento pseudo-plástico ya que al graficar la viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla se obtiene un perfil similar al mostrado anteriormente en la Figura 3. Comportamiento de un fluido Pseudo-plástico, en la sección de introducción.

Una vez obtenidos los datos experimentales, estos fueron sometidos a ajustes matemáticos con lo que se determinó el modelo matemático que mejor se ajusta a su comportamiento. En la

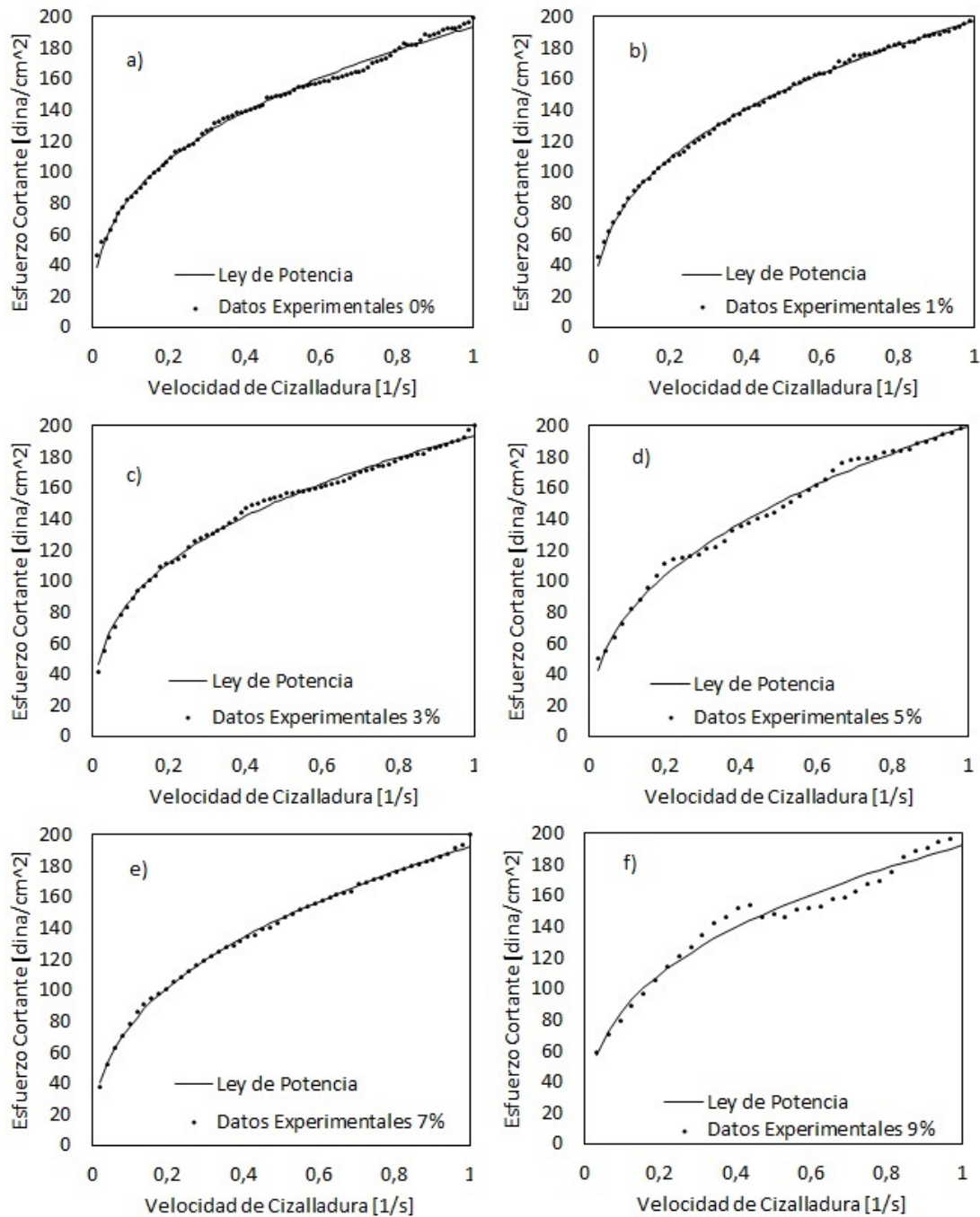


Tabla 4, se presentan los resultados de los diferentes ajustes. Se observa que el mejor ajuste para el comportamiento del fluido está dado por la Ley de Potencia, ya que esta presenta el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más alto de entre todos los modelos a excepción del modelo de Herschel Bulkley, adicionalmente la Ley de Potencia presenta parámetros con desviaciones estándar menores. Se descartó el resto de modelos ya que algunos presentan constantes negativas como Herschel Bulkley y el modelo de Carreau, los modelos restantes tienen considerables desviaciones estándar.

**Tabla 4.** Modelos matemáticos y sus respectivos ajustes

Modelo	Parámetro	0%	1%	3%	5%	7%	9%
<b>Ley de Potencia</b>	k	111.40 ± 0.90	118.30 ± 0.50	125.90 ± 0.80	140.60 ± 1.10	130.20 ± 0.50	160.10 ± 2.70
	n	0.36 ± 0.0067	0.37 ± 0.0041	0.34 ± 0.0068	0.41 ± 0.013	0.40 ± 0.0058	0.35 ± 0.029
	R <sup>2</sup>	0.9952	0.9985	0.9958	0.9929	0.9983	0.9674
<b>Herschel Bulkley</b>	τ <sub>o</sub>	17.17 ± 6.95	13.57 ± 4.04	-24.12 ± 14.36	15.72 ± 12.85	1.62 ± 7.37	0.79 ± 55.16
	k	93.43 ± 7.29	104.10 ± 4.28	150.90 ± 14.90	124.00 ± 13.70	128.50 ± 7.80	159.30 ± 56.30
	n	0.42 ± 0.028	0.42 ± 0.015	0.29 ± 0.028	0.47 ± 0.057	0.40 ± 0.026	0.35 ± 0.16
	R <sup>2</sup>	0.9960	0.9990	0.9966	0.9937	0.9983	0.9651
<b>Bingham</b>	τ <sub>o</sub>	77.83 ± 3.83	78.36 ± 4.24	82.79 ± 5.40	72.33 ± 5.47	71.45 ± 5.19	81.88 ± 8.08
	η	28.18 ± 1.45	33.12 ± 1.82	35.13 ± 2.63	59.30 ± 3.96	49.87 ± 3.31	72.53 ± 8.15
	R <sup>2</sup>	0.9466	0.9465	0.9162	0.9551	0.9493	0.9167
<b>Casson</b>	τ <sub>o</sub>	50.34 ± 2.21	50.25 ± 2.32	54.96 ± 3.64	43.84 ± 3.21	43.95 ± 2.91	53.78 ± 6.65
	η	10.93 ± 0.63	13.03 ± 0.77	12.97 ± 1.24	25.42 ± 2.06	20.93 ± 1.60	27.15 ± 4.76
	R <sup>2</sup>	0.9846	0.9859	0.9684	0.9852	0.9849	0.9533
<b>Carreau</b>	λ	10.14 ± 0.85	10.73 ± 1.05	9.19 ± 0.81	11.34 ± 1.82	8.62 ± 0.93	9.89 ± 2.06
	n	-0.14 ± 0.065	-0.11 ± 0.073	-0.13 ± 0.069	-0.14 ± 0.13	-0.16 ± 0.092	-0.35 ± 0.23
	R <sup>2</sup>	0.9833	0.9802	0.9860	0.9693	0.9844	0.9677

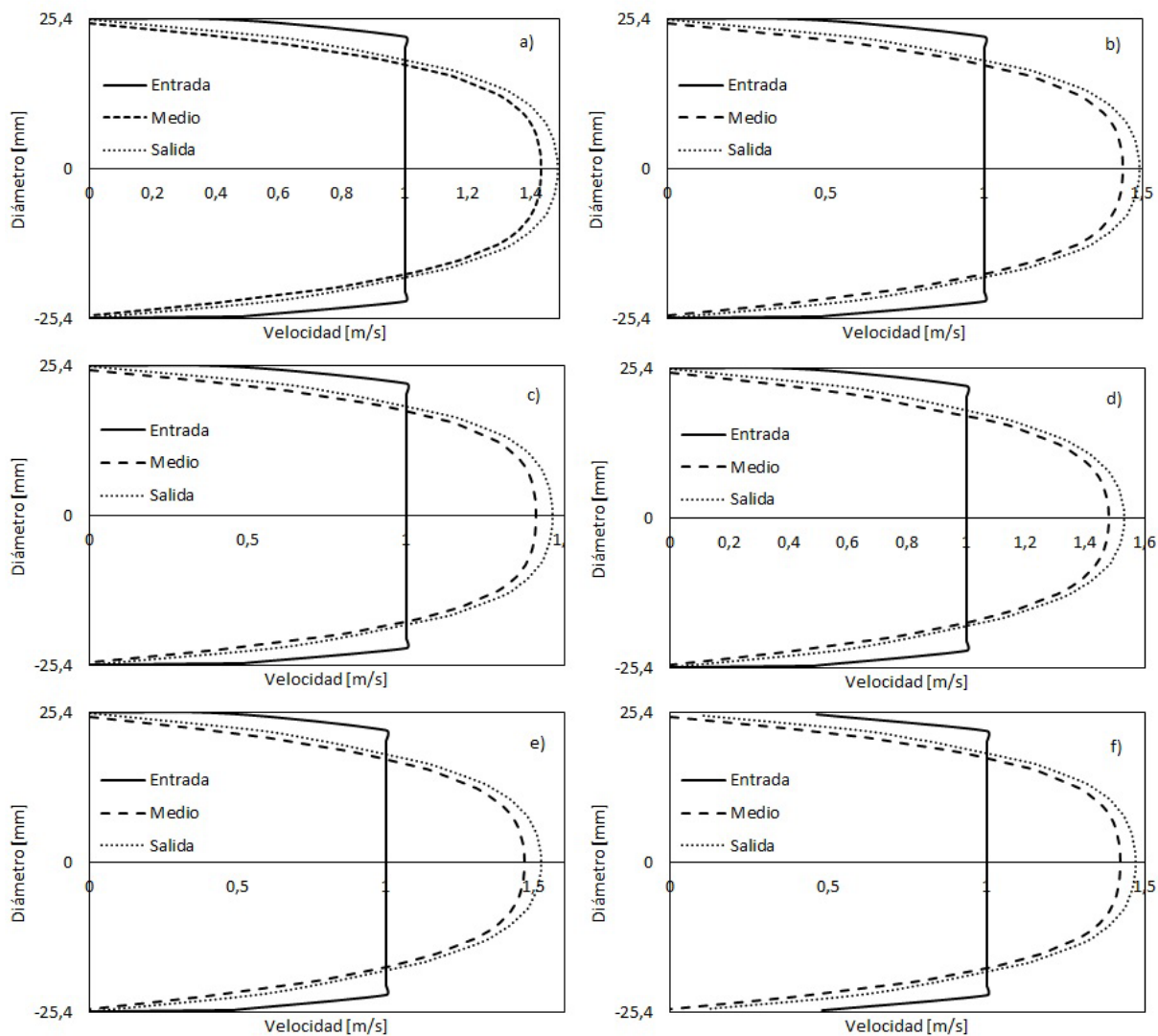
A continuación, se muestran las gráficas de los ajustes realizados utilizando la Ley de Potencia:



**Figura 15.** Ley de Potencia a) Formulación 0% MO, b) Formulación 1% MO, c) Formulación 3% MO, d) Formulación 5% MO, e) Formulación 7% MO, f) Formulación 9% MO.

### 3.2. Simulación de segmento de tubería

Una vez obtenidas las funciones de viscosidad para cada una de las formulaciones, se procedió a realizar una simulación de un segmento de tubería de 2 [in] de diámetro y analizar los perfiles de velocidad para cada caso. Se obtuvieron los siguientes perfiles:



**Figura 16.** Perfiles de velocidad a lo largo de una tubería: **a)** formulación 0% MO **b)** formulación 1% MO **c)** formulación 3% MO **d)** formulación 5% **e)** formulación 7% **f)** formulación 9%

La Figura 16 muestra que los fluidos en cuestión presentan un flujo laminar dentro de la tubería con condiciones de “no deslizamiento”, por lo que se muestra que en las paredes

de la tubería una velocidad nula. Se obtuvieron perfiles parabólicos característicos de un fluido laminar (Bird et al. 2012) cuya velocidad está dada por la ecuación (25):

$$V_z = \frac{\Delta P R^2}{4\mu l} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (25)$$

A continuación, se muestra un resumen de los datos de velocidades y presiones máximas dentro de la tubería:

**Tabla 5.** Velocidad y presión máxima para cada una de las formulaciones

Formulación	Velocidad máxima [m/s]	Presión [Pa]
0%	1,48	10200
1%	1,49	11500
3%	1,46	10500
5%	1,53	16700
7%	1,52	14800
9%	1,47	13900

En la Tabla 5, se observa que los valores máximos tanto para velocidad como para presión son los de la formulación de 5%. Esto se debe a que el exponente de la ley de potencia para esta formulación es 0.41, el mismo que es el mayor de todos. Al observar las ecuaciones (16) y (1726) que rigen el flujo del fluido dentro de la simulación se observa que a medida que mayor sea el índice de comportamiento del fluido “*n*”, mayor será la viscosidad. En la ecuación (17) se observa que la magnitud de la viscosidad afecta directamente a la velocidad, por lo que la velocidad es mayor cuando “*n*” es mayor.

### 3.3. Contenido de Na, Ca y Fe

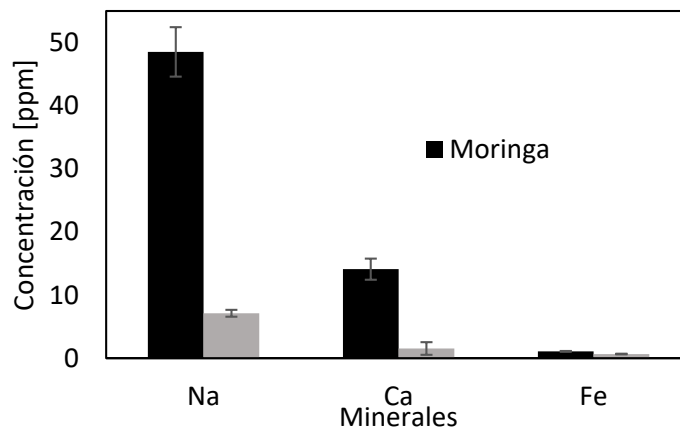
Se realizaron estudios acerca del contenido de sodio (Na), hierro (Fe) y calcio (Ca) presentes en muestras a base de cereales con diferentes formulaciones variando de 0% a

9% el contenido de pasta de *Moringa oleifera* proporcionado por ECUAMORINGA. Las pruebas se realizaron por triplicado y se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 6.** Concentración de Na, Ca y Fe en diferentes formulaciones de masa reológica, harina y *Moringa oleifera* Lam.

Formulación	Minerales		
	Na [ppm]	Ca [ppm]	Fe [ppm]
0%	20.83 ± 0.37	1.74 ± 0.21	0.32 ± 0.03
1%	25.19 ± 0.21	2.86 ± 0.37	0.33 ± 0.03
3%	27.56 ± 0.37	3.95 ± 0.18	0.38 ± 0.05
5%	29.29 ± 0.21	4.89 ± 0.11	0.40 ± 0.03
7%	30.38 ± 0.23	5.49 ± 0.22	0.51 ± 0.04
9%	32.75 ± 0.26	7.52 ± 0.28	0.56 ± 0.02
Moringa	48.53 ± 3.92	14.10 ± 1.67	1.08 ± 0.06
Harina	7.10 ± 0.55	1.53 ± 1.00	0.65 ± 0.05

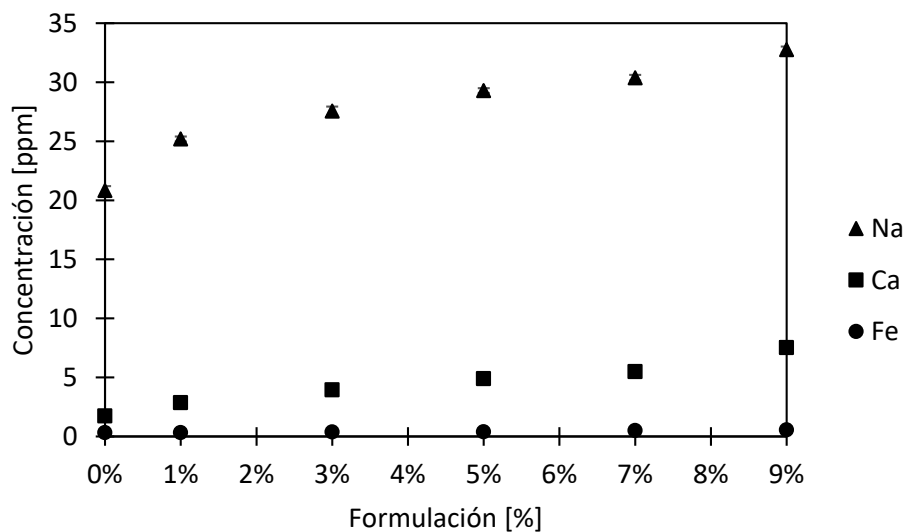
Como se puede observar en la Tabla 6, para 2 gramos de muestra el contenido de sodio presente en la *Moringa oleifera* es 6.84 veces mayor que el contenido de harina de trigo fortificada, el contenido de calcio es 9.22 veces mayor y el contenido de hierro es 1.67 veces mayor.



**Figura 17.** Comparación entre moringa oleífera y harina fortificada

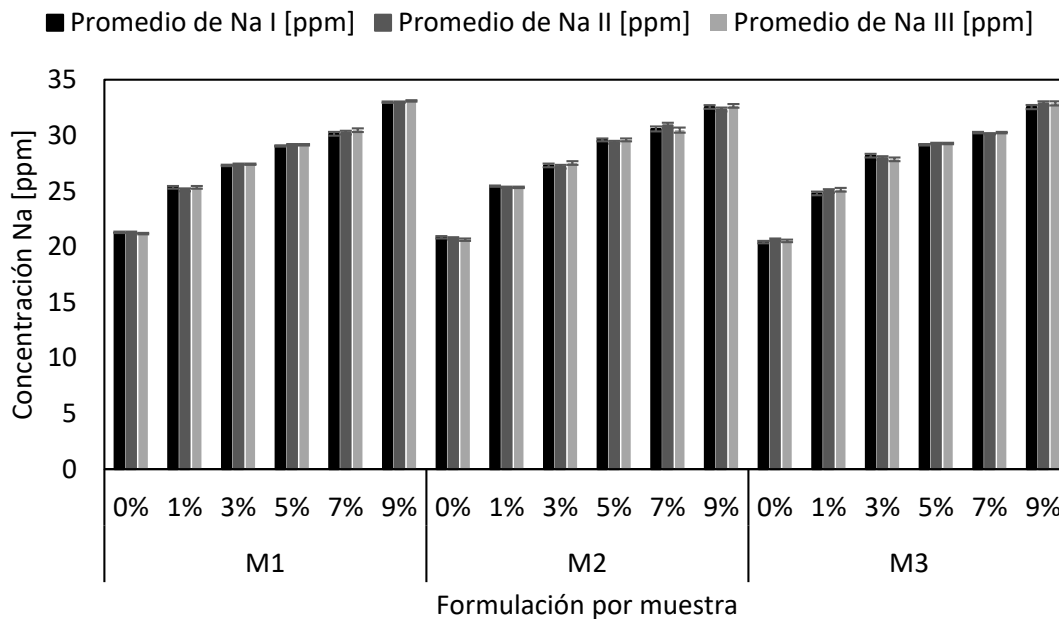
Los resultados obtenidos en la Tabla 6 fueron comparados con los valores de literatura presentados en la Tabla 1 en la sección de introducción. Se determinó una diferencia del 7.2% en contenido de hierro entre el presente trabajo y el realizado por Chinma et al. Adicionalmente, se determinó una diferencia del 50.32% entre ambos estudios. Estas diferencias significativas están debidas al hecho del uso de semillas de *Moringa oleifera* Lam. por parte de Chinma et al. con respecto al uso de la pasta de moringa. Adicionalmente, los métodos empleados son diferentes.

Adicionalmente, se puede observar que a mayor concentración de *Moringa oleifera* Lam. en la muestra, mayor será la concentración de minerales en cada muestra. Para hacer más evidente dicho aumento se presenta la Figura 18.



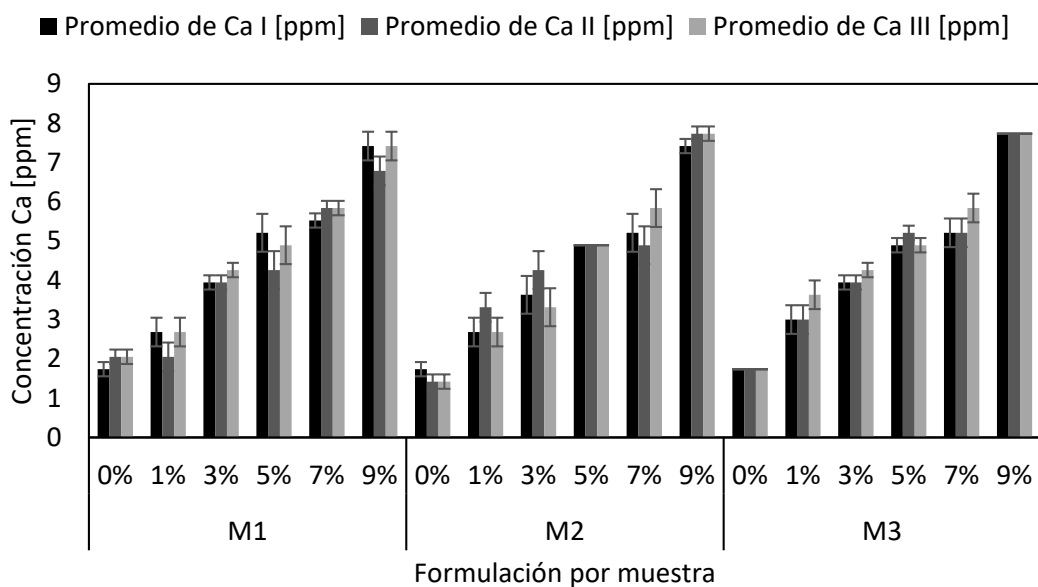
**Figura 18.** Concentración de minerales en cada una de las formulaciones

Se puede observar claramente el aumento de sodio y hierro ya que como se presentó en la Figura 17 existe mayor cantidad de estos minerales en la *Moringa oleifera* a diferencia del calcio que se encuentra en menores proporciones por lo que el aumento de este mineral no es tan evidente. A continuación, en la Figura 19 se muestran los resultados individuales de cada metal por cada formulación analizada:



**Figura 19.** Concentración de sodio en cada una de las formulaciones

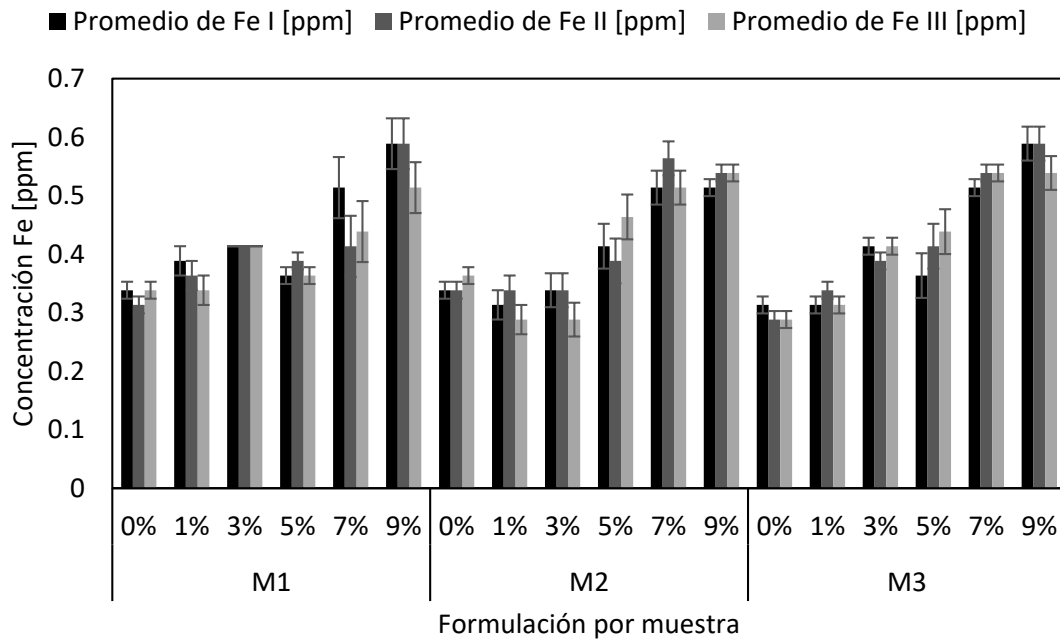
Como se mencionó anteriormente, los resultados de calcio en la Figura 18 se mostrarán de mejor manera en la Figura 19, debido a la escala empleada. Cabe resaltar que “M1”, “M2” y “M3” son las experimentaciones realizadas por triplicado para cada una de las formulaciones.



**Figura 20.** Concentración de calcio en cada una de las formulaciones.



Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para hierro:



**Figura 21.** Concentración de hierro en cada una de las formulaciones.

Se realizó un análisis estadístico de la varianza (ANOVA por sus siglas en inglés), mediante el cual se determinó la existencia de diferencias significativas entre cada una de las formulaciones, para cada metal analizado. Es importante definir un valor  $\alpha=0.05$  lo que nos da el 95% de confiabilidad de los resultados. Adicionalmente se debe plantear una hipótesis nula en la que la media de todas las mediciones va a ser igual, si el factor “ $p$ ” de probabilidad en contra de la hipótesis nula es menor a “ $\alpha$ ” entonces se rechaza la hipótesis nula y se establece que al menos una de las varianzas es diferente (Montgomery, D., 2013). Para cada uno de los casos el factor “ $p$ ” fue 0, por lo que se establece que al menos uno de los valores es diferente al resto. En cuanto a hierro (Fe) se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 7.** Análisis de la varianza para contenido de hierro

<b>Formulación</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Promedio [ppm]</b>	<b>Categoría</b>
0%	3	0,32	A
1%	3	0,33	A
3%	3	0,38	A
5%	3	0,40	A
7%	3	0,51	B
9%	3	0,56	B

Cabe resaltar que los elementos con diferentes letras son estadísticamente diferentes de una manera significativa. Las categorías se definieron a partir del análisis de Tukey. Las formulaciones son estadísticamente diferentes a partir del 7% al 9% de adición de *Moringa oleifera* Lam.

Para el análisis de calcio (Ca) se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 8.** Análisis de la varianza para contenido de calcio

<b>Formulación</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Promedio [ppm]</b>	<b>Categoría</b>
0%	3	1,7	A
1%	3	2,9	B
3%	3	3,9	B
5%	3	4,9	C
7%	3	5,5	D
9%	3	7,5	E

La Tabla 8 muestra que todos los valores son significativamente diferentes a excepción de la formulación de 1% y 3% de contenido de *Moringa oleifera* Lam. ya que son estadísticamente similares.

Para el análisis de sodio (Na) se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 9.** Análisis de la varianza para contenido de sodio

Formulación	Repeticiones	Promedio [ppm]	Categoría
0%	3	20,832	A
1%	3	25,194	B
3%	3	27,564	C
5%	3	29,289	D
7%	3	30,383	E
9%	3	32,765	F

En la Tabla 9 se puede observar que el contenido de sodio va aumentando de forma significativa con la adición de *Moringa oleifera* Lam.

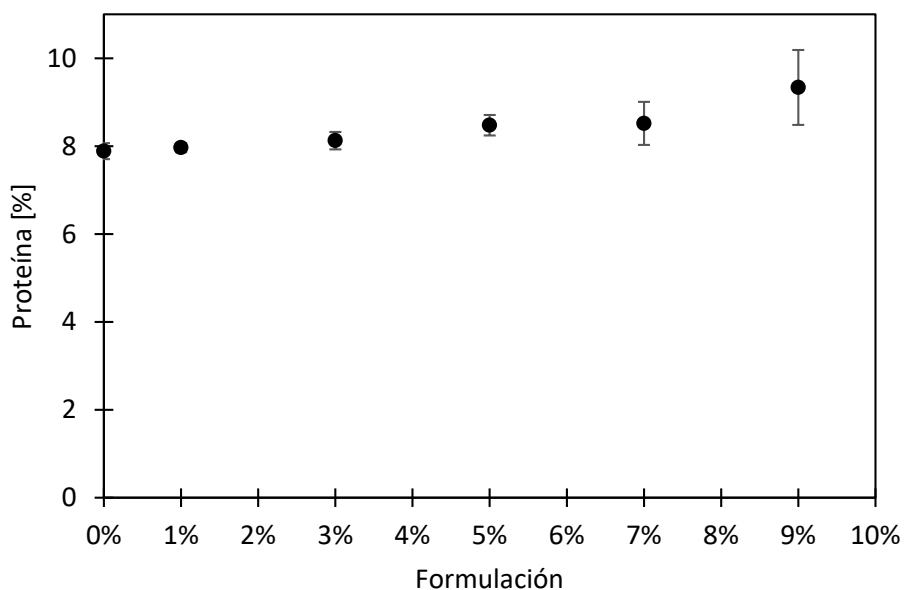
### 3.4. Contenido de Proteína

Se realizaron pruebas de contenido de proteína mediante el método de Kjeldahl, se analizó cada muestra por triplicado y se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 10.** Porcentaje de proteína presente en cada formulación, harina y *Moringa oleifera* Lam.

Formulación	Proteína [%]
0%	7.89 ± 0.18
1%	7.97 ± 0.10
3%	8.13 ± 0.20
5%	8.48 ± 0.23
7%	8.52 ± 0.49
9%	9.34 ± 0.85
Moringa	55.21 ± 0.30
Harina	14.98 ± 0.32

En la Tabla 10 se puede observar que el contenido de proteína tiene un ligero aumento a medida que aumenta el contenido de *Moringa oleifera* Lam. en la sustitución. En cuanto a la *Moringa oleifera* Lam. tiene 3.69 veces más de contenido proteico que la harina de trigo. Es un valor que difiere en un 3.5% al contenido presentado por Chinma et al. en el año 2013.



**Figura 22.** Contenido de proteína de las diferentes formulaciones

Se puede observar en la Figura 22 que el cambio en porcentaje de proteína a medida que aumenta el porcentaje de *Moringa oleifera* Lam. en la muestra no es tan pronunciado. Al realizar el análisis de ANOVA se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 11.** Análisis de varianza para contenido de proteína

Formulación	Repeticiones	Promedio [ppm]	Categoría
0%	3	7,8864	A
1%	3	7,967	B
3%	3	8,1265	B
5%	3	8,478	B
7%	3	8,519	B
9%	3	9,336	B

En la Tabla 11 se observa que las muestras al contener *Moringa oleifera* Lam. en ellas, tienen un cambio de proteína estadísticamente significativo lo que las diferencia de forma marcada de la muestra control con 0% de MO.

### 3.5. Contenido de Grasa

Se realizaron pruebas de porcentaje de grasa mediante el método de Soxhlet, se realizaron las muestras por triplicado y se obtuvieron los resultados presentes en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Porcentaje de grasa en formulaciones 0% y 9%

Formulación	Grasa [%]
0%	$7.78 \pm 0.71$
9%	$7.97 \pm 0.19$

Cabe recalcar, que el contenido de grasa es constante en las formulaciones ya que la principal fuente de grasa es la margarina, cuya cantidad se puede ver en la Tabla 2. Adicionalmente, se utilizó pasta de *Moringa oleifera* Lam. sin contenido de aceite y grasa, por lo que se esperaba que el contenido de grasa en todas las formulaciones se mantuviera constante.

## 4. Conclusiones

Los estudios reológicos realizados a los fluidos obtenidos a partir de diferentes formulaciones a base de cereales con adición de *Moringa oleifera* Lam., determinaron que el comportamiento se rige por la ley de potencia cuya forma es  $\tau = \kappa\dot{\gamma}^n$ , descartando de esta manera el resto de modelos matemáticos. Cada formulación obtuvo sus propios índices de comportamiento e índices de consistencia del fluido, los cuales fueron parámetros determinantes para realizar la simulación de su flujo a través de un segmento de tubería. Los índices de comportamiento para las formulaciones de 0% a 9% fueron menores a 1, lo que implica que tienen un comportamiento de adelgazamiento por

cizalladura. Este comportamiento hace referencia al hecho de que la viscosidad del fluido disminuye al tener influencia de un estrés cortante, es decir un comportamiento pseudo-plástico como se puede observar en la Figura 14.

Los perfiles de velocidad obtenidos muestran que el fluido sigue un flujo laminar ya que presentan una forma parabólica. La formulación de 5% obtuvo velocidad y presión máxima de entre todas las formulaciones, lo que se relaciona con su índice de comportamiento “n”, el mismo que fue el mayor de entre todos los casos. Es importante establecer que la velocidad de los fluidos aumenta con su paso a través de la tubería debido a que el estrés del fluido aumenta por lo que su viscosidad disminuye.

Los estudios realizados en cuanto a contenido en minerales como Na, Ca y Fe reflejaron un aumento cuantitativo con el aumento de contenido de *Moringa oleifera* Lam. Es importante resaltar que la dosis recomendada es de 2 semillas de moringa al día (Ecuamoringa, 2017), lo que equivale a la formulación de 3%. Siendo ésta la óptima para el consumo no solo por su contenido, sino también por su sabor. Su alto contenido en sodio es favorable para salud para regular la presión, actividad celular y para la distribución de fluidos en el cuerpo. El sodio cumple la función de electrolito en la sangre lo que permite que el agua llegue a todos los órganos del cuerpo evitando su daño. Adicionalmente, el alto contenido en calcio favorece el cuidado y mantenimiento de los huesos y dientes (Power et al., 1999). El calcio también es responsable de conducir la electricidad a lo largo de nuestro cuerpo, lo que mantiene el ritmo cardiaco funcionando adecuadamente. A pesar de que el contenido en sodio y calcio es mayor, el contenido de hierro también tiende a aumentar con la adición de *Moringa oleifera* Lam. en las muestras. Esto es importante en la salud ya que es parte de la producción de glóbulos rojos y ayuda a que la hemoglobina se una al oxígeno en nuestro cuerpo (Thompson, J.

1944). El contenido de estos tres minerales guarda relación proporcional con el contenido de *Moringa oleifera* Lam. en las formulaciones.

Se realizó un análisis estadístico para determinar las diferencias significativas entre las formulaciones al 95% de confiabilidad y se obtuvo que para el caso de sodio (Na), todas las formulaciones son significativamente diferentes entre sí. En cuanto a hierro (Fe) las formulaciones son significativamente diferentes entre sí. En cuanto a calcio (Ca) las formulaciones de 0% al 5% no varían significativamente entre ellas, mientras que si comparamos el 0% con el 9% de MO se obtiene una diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey realizada. Finalmente, para los análisis de calcio (Ca) se obtuvo que todas son significativamente diferentes, lo que implica que la adición de *Moringa oleifera* Lam. cambia totalmente la composición de cada una de las formulaciones.

La literatura indica que el contenido de calcio y hierro de la *Moringa oleifera* Lam. es 4.58 y 1.55 veces mayor que la harina de trigo, respectivamente. Los resultados obtenidos indican que la harina de *Moringa oleifera* Lam. contiene 9.22 y 1.67 veces más de calcio y hierro, respectivamente que la harina de trigo. Al comparar estos resultados con la literatura, se puede observar una diferencia en el contenido de calcio y hierro, esto puede darse debido a la diferencia de métodos utilizados para su determinación y también al hecho del uso de pasta de *Moringa oleifera* Lam. frente al uso de su semilla.

En los estudios realizados de proteína muestran una diferencia de 3.69 en el contenido de proteína entre la *Moringa oleifera* Lam. y la harina de trigo. Este valor al ser comparado con el de la literatura de 3.58, muestra un gran parecido en los resultados por lo que se evidencia que el método utilizado para la obtención de proteína fue el adecuado.

La sustitución de harina por pasta de semilla de *Moringa oleifera* Lam. reflejó una mejora significativa de los parámetros nutricionales de la masa. En cuanto al porcentaje de grasa obtenido, no se encuentra una diferencia significativa entre los resultados ya que al no

tener contenido de aceite la pasta empleada de *Moringa oleifera* Lam., se mantiene prácticamente igual en las formulaciones.



## 5. Agradecimientos

Este proyecto fue financiado gracias al USFQ Collaboration Grant 2017. Agradezco al Departamento de Ingeniería Química y al Departamento de Ingeniería en Alimentos por la ayuda prestada para la realización de este proyecto. Agradezco a Andrea Landázuri, Ph.D. por la oportunidad de realizar investigación en el área de alimentos. A Gabriela Vernaza, Ph.D. por el apoyo incondicional para el desarrollo de este proyecto. Mi agradecimiento también es para Carolina Andino y Nathalie Pineda por su ayuda en el laboratorio.

Finalmente, agradezco a mi mamá Ana Zumárraga por ser mi ejemplo a seguir y mi guía en todo momento, a mi abuelita Ana Minas quien siempre estuvo a mi lado apoyándome en los momentos más difíciles y a todas las personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera.

## **6. Dedicatoria**

Dedico mi proyecto de titulación a mi abuelito Carlos Zumárraga, este nuevo logro es para él que aun que esté en el cielo yo sé que se sentirá muy orgulloso de mí. Mi familia es mi pilar y motivación a seguir, gracias por creer y confiar siempre en mí. Este trabajo es para todos ustedes, por amarme y apoyarme siempre, no hay palabras que puedan describir mi amor y gratitud hacia ustedes.

## 7. Referencias bibliográficas

- Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2012). *Transport Phenomena*. *Saudi Med J* (Vol. 33).  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Brookfield Engineering Lbs., I. (2003). *More Solutions to Sticky Problems*. New York: Brookfield.
- Buchelli, M. d. (2015). *Estudio de Prefactibilidad para la Producción de Harina de Moringa como suplemento alimenticio del sector Pecuario en la Provincia de el Oro*. Obtenido de [http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/2013/1/CD775\\_TESIS.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/2013/1/CD775_TESIS.pdf)
- Chinma, C., Gbadamos, K., Ogusina, B., Oloyede, O., & Salami, S. (2012). *Effect of addition of Germinated Moringa Seed Flour on the quality attributes of Wheat-based cake*. Minna, Nigeria: *Journal of Food Processing and Preservation*.
- Christen, W., & Michael Gaziano, C. H. (2000). *Design of Physicians' Health Study II—A Randomized Trial of Beta-Carotene, Vitamins E and C, and Multivitamins, in Prevention of Cancer, Cardiovascular Disease, and Eye Disease, and Review of Results of Completed Trials*. New York: *Annals of Epidemiology*.
- Dachana, K. B., Rajiv, J., Indrani, D., & Prakash, J. (2010). *Effect of dried moringa (moringa oleifera lam) leaves on rheological, microstructural, nutritional, textural and organoleptic characteristics of cookies*. Mysore, India: *Journal Food Quality*.
- Dale, I. M. (1982). Atomic Absorption Spectrometry. *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry*, 5, 381–394. [https://doi.org/10.1016/S0167-9244\(08\)70094-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9244(08)70094-5)
- Ecuamoringa. (2017). *Ecuamoringa*. Obtenido de <http://www.ecuamoringa.com/>

- El-Gammal, R. E., Ghoneim, G. A., & ElShehawy, S. M. (2016). *Effect of Moringa Leaves Powder (Moringa oleifera) on Some Chemical and Physical Properties of Pan Bread*. Mansoura, Egipto: ResearchGate.
- Foidl, N., Makkar, H., & Becker, K. (2001). *The potential of Moringa oleifera for agricultural and industrial uses. In The Miracle Tree/The Multiple Attributes of Moringa (L.J. USA: L. J. Fuglie.*
- Giancoli, D. (2008). *Física para Ciencias e Ingeniería*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson.
- González, C. I. (s.f.). *Historia de la Hidráulica*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/278756615/Historia-de-La-Hidraulica>
- Granado, F., Olmedilla, B., & Blanco, I. (2003). *Nutritional and clinical relevance of lutein in human health*. Madrid: British Journal of Nutrition.
- Irgens, F. (2013). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Trondheim Norway: Springer.
- Malkin, A., & Isayev, A. (2005). *Rheology. Concepts, Methods, and Applications: Concepts, Methods, and Applications*. Toronto, Canada: ChemTec Publishing.
- Meher, J., Mazumdar, B., Dixit, N., Keshav, S., & Keshav, A. (2017). *Rheological studies on moringa leaves (Moringa oleifera) purees*. Chhattisgarh, India: Research Journal of Chemical Sciences.
- Montgomery, D. (2013). *Design and analysis of experiments*. Arizona: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Mune, M. A., Bassogog, C. B., Nyobe, E., & Minka, S. R. (2016). *Physicochemical and functional properties of Moringa Oleifera seed and leaf flour*. Camerún, Africa: Cogent OA.

- O'Dell, J. W. (1993). Determination of Total Kjeldahl Nitrogen by Semiautomated colorimetry. *Environmental Monitoring Systems Laboratory*, (August), 1–15.
- Ogunsina, B. S., Radha, C., & Indrani, D. (2011). *Quality characteristics of bread and cookies enriched with debittered Moringa oleifera seed flour*. Mysore, India: Informa Healthcare.
- Ortíz, J. E. (2006). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Power, M., Heaney, R., Kalkwarf, H., Pitkin, R., Repke, J., Tsang, R., & Schulkin, J. (1999). *The role of calcium in health and disease*. Los Angeles, California: American Journal of Obstetrics and Gynecology.
- Rojas, M. I. (2012). *Fundamentos de Reología*. Obtenido de Universidad de los Andes: <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S521C.pdf>
- Rojas, O. (1999). *Introducción a la Reología*. Mérida, Venezuela.
- Thompson, J. (1944). *Determination of Iron in Food Products*. Chicago, USA: Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition.
- Viswanath, D., Ghosh, T., Prasad, D., Dutt, N., & Rani, K. (2007). *Viscosity of liquids*. Springer Netherlands.

## 8. Anexos

**Tabla 13.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 0% MO.

RPM	Datos Experimentales									Datos Calculados					Modelos Matemáticos				
	Viscosidad 1 [cp]	Viscosidad 2[cp]	Viscosidad 3[cp]	Viscosidad Promedio [dina s cm <sup>-2</sup> ]	Viscosidad Absoluta	Torque [dina/cm] 1	Torque [dina/cm] 2	Torque [dina/cm] 3	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla Absoluta	Estrés Cortante Promedio [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés Cortante Absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau
1	127000	152000	146000	141666,6667	1	25,2	20,4	24,1	23,23333333	0,104666667	0,052405891	0,011494253	46,60260011	0,234128317	38,17368157	44,05762899	79,30679801	61,65236252	140635,94
2	86981	92380	84582	87981	0,621042353	29,3	25,6	27,1	27,33333333	0,209333333	0,104811782	0,022988506	54,82658837	0,275445079	49,10188229	53,20359368	80,78359602	66,67363286	137669,54
3	70185	66386	60787	65786	0,464371765	32,9	22,2	30	28,36666667	0,314	0,157217673	0,034482759	56,89930086	0,285858247	56,8924303	59,93500478	82,26039402	70,65986336	133105,32
4	60437	54288	50989	55238	0,389915294	35,8	24,6	33,3	31,23333333	0,418666667	0,209623564	0,045977011	62,64940647	0,314746389	63,15856227	65,46060509	83,73719203	74,11031782	127397,036
5	52429	47270	43551	47750	0,337058824	38,1	27,7	36,1	33,96666667	0,523333333	0,262029455	0,057471264	68,1320653	0,342290897	68,49043933	70,23368873	85,21399004	77,21838187	121009,495
6	47570	41991	38792	42784,33333	0,302007059	40,1	30,6	38,4	36,36666667	0,628	0,314435346	0,068965517	72,94610721	0,366476318	73,17935555	74,48174015	86,69078805	80,08323542	114343,602
7	43019	37963	35550	38844	0,274192941	42,7	32,8	40,6	38,7	0,732666667	0,366841237	0,08045977	77,62642573	0,389989923	77,39335159	78,33766737	88,16758605	82,7637959	107702,88
8	39142	32618	32768	34842,66667	0,245948235	43,1	34,9	44,2	40,73333333	0,837333333	0,419247128	0,091954023	81,70498901	0,410480349	81,23932938	81,8869017	89,64438406	85,29845127	101292,442
9	24461	28927	30394	27927,33333	0,197134118	43,1	36,9	45,9	41,96666667	0,942	0,471653019	0,103448276	84,17887165	0,422908969	84,79005673	85,1881073	91,12118207	87,7138659	95235,1731
10	22975	26514	28674	26054,33333	0,183912941	43,7	38,2	47,7	43,2	1,046666667	0,52405891	0,114942529	86,6527543	0,435337588	88,09759374	88,28357418	92,59798008	90,02945395	89592,9492
11	21650	25524	27431	24868,33333	0,175541176	44,9	40	49,8	44,9	1,151333333	0,576464801	0,126436782	90,06270065	0,452468928	91,20063657	91,20494824	94,07477808	92,25987155	84386,1645
12	20696	23545	25994	23411,66667	0,165258824	46,8	41,4	50,8	46,33333333	1,256	0,628870692	0,137931034	92,93775345	0,466913	94,12883313	93,97662204	95,55157609	94,41650505	79609,0756
13	19888	22766	24418	22357,33333	0,157816471	47,9	43,3	52,5	47,9	1,360666667	0,681276583	0,149425287	96,08025303	0,482700705	96,90546548	96,61785549	97,0283741	96,50840942	75240,7754
14	19067	21595	23438	21366,66667	0,150823529	49,8	44,6	54	49,46666667	1,465333333	0,733682474	0,16091954	99,22275261	0,498488411	99,5491942	99,14416266	98,50517211	98,5429264	71252,5479
15	18196	20556	22515	20422,33333	0,144157647	50,2	46,2	55,8	50,73333333	1,57	0,786088365	0,172413793	101,7634969	0,511252939	102,0752358	101,5682525	99,98197012	100,5261066	67612,5474
16	17621	19469	21550	19546,66667	0,137976471	51,9	47	57,1	52	1,674666667	0,838494256	0,183908046	104,3042413	0,524017467	104,4961823	103,9006872	101,4587681	102,4630068	64288,6281
17	16832	19055	21143	19010	0,134188235	52,5	47,9	58,9	53,1	1,779333333	0,890900147	0,195402299	106,5106772	0,535102452	106,8225878	106,1503544	102,9355661	104,3579041	61249,9536
18	16396	18496	20062	18318	0,129303529	53,5	49,4	60,8	54,56666667	1,884	0,943306038	0,206896552	109,4525917	0,549882432	109,0633969	108,3248148	104,4123641	106,2144552	58467,8314
19	15912	18028	19922	17954	0,126734118	55,9	50,5	62,1	56,16666667	1,988666667	0,995711929	0,218390805	112,6619529	0,566006046	111,2262651	110,4305619	105,8891621	108,0358149	55916,0684
20	15447	16766	18846	17019,66667	0,120138824	56,1	51,6	62,1	56,6	2,093333333	1,04811782	0,229885057	113,5311549	0,570372859	113,3178017	112,4732206	107,3659602	109,8247276	53571,0443

21	15282	16515	18110	16635,66667	0,117428235	56,1	53	63,3	57,46666667	2,198	1,10052371	0,24137931	115,269559	0,579106483	115,3437573	114,4577002	108,8427582	111,5835989	51411,6248
22	14806	15897	17505	16069,33333	0,113430588	56,9	54,1	63,5	58,16666667	2,302666667	1,152929601	0,252873563	116,6736545	0,586160564	117,3091706	116,388315	110,3195562	113,3145508	49418,9916
23	14214	15230	17089	15511	0,109489412	58,1	54,7	63,9	58,9	2,407333333	1,205335492	0,264367816	118,1446118	0,593550554	119,2184844	118,2688801	111,7963542	115,0194667	47576,4364
24	14097	15172	16471	15246,66667	0,107623529	59,5	56,5	65	60,33333333	2,512	1,257741383	0,275862069	121,0196646	0,607994625	121,0756389	120,1027878	113,2731522	116,7000275	45869,1446
25	13797	14613	15989	14799,66667	0,104468235	61,6	57,3	66,9	61,93333333	2,616666667	1,310147274	0,287356322	124,2290258	0,62411824	122,8841466	121,8930703	114,7499502	118,3577404	44283,9864
26	13382	14525	15620	14509	0,102416471	62,5	58,5	68,1	63,03333333	2,721333333	1,362553165	0,298850575	126,4354617	0,635203225	124,6471538	123,6424504	116,2267482	119,9939634	42809,3209
27	13242	14019	15508	14256,33333	0,100632941	63,1	59,6	68,5	63,73333333	2,826	1,414959056	0,310344828	127,8395573	0,642257306	126,3674918	125,3533837	117,7035462	121,6099251	41434,818
28	12962	13900	15018	13960	0,098541176	65,1	60,5	70,7	65,43333333	2,930666667	1,467364947	0,32183908	131,2495036	0,659388646	128,0477181	127,0280939	119,1803442	123,2067412	40151,3002
29	12721	13570	14562	13617,66667	0,096124706	65,5	61,2	70,7	65,8	3,035333333	1,519770838	0,333333333	131,9849822	0,663083641	129,690152	128,6686018	120,6571422	124,7854289	38950,6007
30	12477	13197	14057	13243,66667	0,093484706	66,3	63	71	66,76666667	3,14	1,572176729	0,344827586	133,9239713	0,672824992	131,2969042	130,2767503	122,1339402	126,3469179	37825,4404
31	12500	13120	13894	13171,33333	0,092974118	67,2	63,2	71,2	67,2	3,244666667	1,62458262	0,356321839	134,7931734	0,677191804	132,8699017	131,8542256	123,6107382	127,8920616	36769,3192
32	12091	13040	13628	12919,66667	0,091197647	68,5	63,7	71,3	67,83333333	3,349333333	1,676988511	0,367816092	136,0635455	0,683574068	134,4109091	133,4025746	125,0875362	129,4216448	35776,4216
33	12070	12509	13306	12628,33333	0,089141176	69,1	63,9	73,4	68,8	3,454	1,729394402	0,379310345	138,0025346	0,693315418	135,9215472	134,9232209	126,5643343	130,9363913	34841,5344
34	11980	12215	12791	12328,66667	0,087025882	69,8	64	72,7	68,83333333	3,558666667	1,781800293	0,390804598	138,0693963	0,693651327	137,4033082	136,4174776	128,0411323	132,4369707	33959,9749
35	11792	12186	12512	12163,33333	0,085858824	70,1	64,3	73,7	69,36666667	3,663333333	1,834206184	0,402298851	139,1391834	0,699025865	138,8575698	137,8865594	129,5179303	133,9240037	33127,5288
36	11431	12012	12397	11946,66667	0,084329412	70,5	64,5	74	69,66666667	3,768	1,886612075	0,413793103	139,7409386	0,702049043	140,2856067	139,3315918	130,9947283	135,3980668	32340,3954
37	11300	11910	12257	11822,33333	0,083451765	71,3	64,7	74,5	70,16666667	3,872666667	1,939017966	0,425287356	140,743864	0,707087672	141,6886011	140,7536208	132,4715263	136,8596968	31595,1409
38	11113	11850	11871	11611,33333	0,081962353	73,2	64,9	74,6	70,9	3,977333333	1,991423857	0,436781609	142,2148213	0,714477662	143,0676517	142,1536196	133,9483243	138,3093946	30888,6565
39	10444	11781	11697	11307,33333	0,079816471	73,5	65	75,5	71,33333333	4,082	2,043829748	0,448275862	143,0840233	0,718844474	144,4237814	143,5324963	135,4251223	139,7476282	30218,1222
40	9898	11601	11323	10940,66667	0,077228235	79,9	65,2	75,9	73,66666667	4,186666667	2,096235639	0,459770115	147,7643418	0,742358079	145,7579445	144,8910991	136,9019203	141,1748357	29580,9759
41	9525	11526	11163	10738	0,075797647	80,1	65,3	75,9	73,76666667	4,291333333	2,14864153	0,471264368	147,9649269	0,743365805	147,0710331	146,230222	138,3787183	142,5914281	28974,885
42	9327	11492	10999	10606	0,074865882	80,5	65,3	76,1	73,96666667	4,396	2,201047421	0,482758621	148,3660971	0,745381256	148,3638821	147,5506096	139,8555163	143,9977916	28397,722
43	9110	11188	10700	10332,66667	0,072936471	80,5	65,2	77,1	74,26666667	4,500666667	2,253453312	0,494252874	148,9678523	0,748404434	149,6372746	148,8529607	141,3323143	145,3942894	27847,5438
44	8903	11111	10689	10234,33333	0,072242353	80,8	65,5	78,1	74,8	4,605333333	2,305859203	0,505747126	150,0376394	0,753778972	150,8919457	150,1379329	142,8091123	146,7812636	27322,5721
45	8851	10904	10371	10042	0,070884706	80,9	66,8	78,1	75,26666667	4,71	2,358265094	0,517241379	150,9737031	0,758481693	152,128587	151,4061454	144,2859103	148,1590373	26821,1769
46	8881	10772	10328	9993,66667	0,070543529	81,3	68,3	78,1	75,9	4,814666667	2,410670985	0,528735632	152,2440753	0,764863957	153,3478498	152,6581819	145,7627084	149,5279153	26341,862
47	9024	10491	10006	9840,33333	0,069461176	81,6	70,7	78,3	76,86666667	4,919333333	2,463076876	0,540229885	154,1830644	0,774605307	154,5503484	153,8945939	147,2395064	150,8881862	25883,2518

48	8961	10215	9860	9678,666667	0,06832	81,7	71,3	78,7	77,23333333	5,024	2,515482767	0,551724138	154,918543	0,778300302	155,7366627	155,1159027	148,7163044	152,2401234	25444,0794
49	8925	9867	9561	9451	0,066712941	81,9	72,6	78,7	77,73333333	5,128666667	2,567888658	0,563218391	155,9214684	0,783338932	156,907341	156,3226018	150,1931024	153,583986	25023,1768
50	8650	9847	9466	9321	0,065795294	81,9	72	79,9	77,93333333	5,233333333	2,620294549	0,574712644	156,3226385	0,785354384	158,0629023	157,515159	151,6699004	154,9200198	24619,4653
51	8575	9790	9363	9242,666667	0,065242353	81,9	72,9	79,9	78,23333333	5,338	2,67270044	0,586206897	156,9243938	0,788377561	159,2038384	158,6940177	153,1466984	156,2484587	24231,9473
52	8375	9413	8894	8894	0,062781176	82	73,5	80	78,5	5,442666667	2,725106331	0,597701149	157,4592873	0,79106483	160,3306159	159,8595996	154,6234964	157,5695249	23859,6994
53	8432	9372	8941	8915	0,062929412	82,3	74	80,1	78,8	5,547333333	2,777512222	0,609195402	158,0610426	0,794088008	161,4436777	161,0123051	156,1002944	158,8834302	23501,8652
54	8109	9255	8920	8761,333333	0,061844706	82,9	73	81,3	79,06666667	5,652	2,829918113	0,620689655	158,5959361	0,796775277	162,543445	162,1525156	157,5770924	160,1903762	23157,6498
55	8016	9175	8918	8703	0,061432941	84,1	73,3	82	79,8	5,756666667	2,882324004	0,632183908	160,0668934	0,804165267	163,6303183	163,2805942	159,0538904	161,4905555	22826,3145
56	7841	9165	8827	8611	0,060783529	85,1	73,2	82,3	80,2	5,861333333	2,934729895	0,643678161	160,8692337	0,808196171	164,7046793	164,396887	160,5306884	162,7841517	22507,1718
57	7735	9140	8651	8508,666667	0,060061176	86,1	73,5	82,5	80,7	5,966	2,987135786	0,655172414	161,8721591	0,8132348	165,7668917	165,5017245	162,0074864	164,0713404	22199,5814
58	7695	9120	8642	8485,666667	0,059898824	86,1	74,3	82,6	81	6,070666667	3,039541677	0,666666667	162,4739143	0,816257978	166,8173023	166,5954221	163,4842844	165,3522895	21902,9458
59	7595	9019	8198	8270,666667	0,058381176	87,1	74,8	82,6	81,5	6,175333333	3,091947568	0,67816092	163,4768397	0,821296607	167,8562425	167,6782814	164,9610825	166,6271597	21616,7075
60	7578	8938	8098	8204,666667	0,057915294	87,1	75,8	82,7	81,86666667	6,28	3,144353459	0,689655172	164,2123183	0,824991602	168,8840287	168,7505907	166,4378805	167,8961049	21340,3453
61	7415	8874	7848	8045,666667	0,056792941	87,5	75	82,9	81,8	6,384666667	3,19675935	0,701149425	164,0785949	0,824319785	169,9009638	169,8126261	167,9146785	169,1592726	21073,3716
62	7402	8853	7953	8069,333333	0,05696	88,2	75,8	83	82,33333333	6,489333333	3,24916524	0,712643678	165,148382	0,829694323	170,9073373	170,8646522	169,3914765	170,4168044	20815,3297
63	7322	8387	7932	7880,333333	0,055625882	89,9	76,9	82,7	83,16666667	6,594	3,301571131	0,724137931	166,8199244	0,838092039	171,9034267	171,9069225	170,8682745	171,668836	20565,7915
64	7377	8355	7926	7886	0,055665882	90,7	78,5	85,7	84,96666667	6,698666667	3,353977022	0,735632184	170,4304558	0,856231105	172,8894979	172,9396801	172,3450725	172,9154979	20324,3555
65	7272	8275	8011	7852,666667	0,055430588	90,8	79,4	85,9	85,36666667	6,803333333	3,406382913	0,747126437	171,2327961	0,860262009	173,8658058	173,9631585	173,8218705	174,1569155	20090,6443
66	7289	8236	7989	7838	0,055327059	90,9	80,5	85,9	85,76666667	6,908	3,458788804	0,75862069	172,0351364	0,864292912	174,832595	174,9775819	175,2986685	175,3932094	19864,3034
67	7369	8160	7655	7728	0,054550588	90,9	82,4	85,8	86,36666667	7,012666667	3,511194695	0,770114943	173,2386469	0,870339268	175,7901006	175,983166	176,7754665	176,6244954	19644,9991
68	7419	8117	7710	7748,666667	0,054696471	91,4	84,6	86	87,33333333	7,117333333	3,563600586	0,781609195	175,177636	0,880080618	176,7385483	176,9801178	178,2522645	177,8508855	19432,4173
69	7576	7952	7482	7670	0,054141176	91,8	87,6	85,9	88,43333333	7,222	3,616006477	0,793103448	177,3840719	0,891165603	177,6781551	177,9686369	179,7290625	179,0724871	19226,262
70	7730	7900	7336	7655,333333	0,054037647	91,9	90,6	86,1	89,53333333	7,326666667	3,668412368	0,804597701	179,5905078	0,902250588	178,6091298	178,9489152	181,2058605	180,2894041	19026,254
71	7697	7807	7511	7671,666667	0,054152941	92,2	90,9	90	91,03333333	7,431333333	3,720818259	0,816091954	182,5992839	0,917366476	179,5316733	179,9211378	182,6826585	181,5017363	18832,1296
72	7692	7732	7240	7554,666667	0,053327059	92,4	92,3	86,9	90,53333333	7,536	3,77322415	0,827586207	181,5963585	0,912327847	180,4459791	180,8854829	184,1594566	182,7095805	18643,6401
73	7544	7677	7198	7473	0,052750588	92,8	92	86,3	90,36666667	7,640666667	3,825630041	0,83908046	181,2620501	0,910648304	181,3522337	181,8421224	185,6362546	183,9130296	18460,5499
74	7507	7519	7044	7356,666667	0,051929412	92,9	92,4	87,1	90,8	7,745333333	3,878035932	0,850574713	182,1312521	0,915015116	182,2506169	182,7912222	187,1130526	185,1121739	18282,6366



75	7398	7430	7202	7343,333333	0,051835294	93	92,6	91,1	92,23333333	7,85	3,930441823	0,862068966	185,0063049	0,929459187	183,141302	183,7329425	188,5898506	186,3071001	18109,6893
76	7356	7380	7617	7451	0,052595294	93,1	93,2	94,9	93,73333333	7,954666667	3,982847714	0,873563218	188,0150811	0,944575076	184,0244562	184,6674379	190,0666486	187,4978925	17941,5084
77	7183	7272	7401	7285,333333	0,051425882	93,2	92,6	95	93,6	8,059333333	4,035253605	0,885057471	187,7476343	0,943231441	184,9002413	185,5948577	191,5434466	188,6846323	17777,9047
78	7206	7222	7645	7357,666667	0,051936471	93,4	93,9	95,2	94,16666667	8,164	4,087659496	0,896551724	188,8842831	0,948941888	185,768813	186,5153465	193,0202446	189,8673982	17618,6985
79	7160	7168	7495	7274,333333	0,051348235	93,4	94,4	95,4	94,4	8,268666667	4,140065387	0,908045977	189,352315	0,951293248	186,6303223	187,4290439	194,4970426	191,0462664	17463,7195
80	7191	7114	7273	7192,666667	0,050771765	93,8	96,2	96	95,33333333	8,373333333	4,192471278	0,91954023	191,2244424	0,96069869	187,4849148	188,336085	195,9738406	192,2213108	17312,8058
81	7095	6970	7324	7129,666667	0,050327059	95	96,2	96,7	95,96666667	8,478	4,244877169	0,931034483	192,4948145	0,967080954	188,3327315	189,2366007	197,4506386	193,3926027	17165,8037
82	7023	6880	7177	7026,666667	0,0496	95,2	95,9	97	96,03333333	8,582666667	4,29728306	0,942528736	192,6285379	0,967752771	189,1739088	190,1307175	198,9274366	194,5602114	17022,5667
83	6931	6818	7155	6968	0,049185882	95,6	96	96,8	96,13333333	8,687333333	4,349688951	0,954022989	192,829123	0,968760497	190,0085788	191,0185581	200,4042346	195,7242042	16882,9557
84	6891	6771	7060	6907,333333	0,048757647	95,8	96,4	97,5	96,56666667	8,792	4,402094842	0,965517241	193,698325	0,973127309	190,8368692	191,9002416	201,8810326	196,8846461	16746,8382
85	6923	6670	6934	6842,333333	0,048298824	96,1	97,8	97,8	97,23333333	8,896666667	4,454500733	0,977011494	195,0355589	0,979845482	191,658904	192,775883	203,3578307	198,0416004	16614,0879
86	6808	6655	6897	6786,666667	0,047905882	97,9	97	98,6	97,83333333	9,001333333	4,506906624	0,988505747	196,2390693	0,985891837	192,4748031	193,6455941	204,8346287	199,1951285	16484,5846
87	6778	6480	6865	6707,666667	0,047348235	99	99	99,7	99,23333333	9,106	4,559312515	1	199,0472605	1	193,2846828	194,5094835	206,3114267	200,34529	16358,2135

**Tabla 14.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 1% MO.

Datos Experimentales										Datos Calculados						Modelos Matemáticos						
RPM	Viscosidad [cp]1	Viscosidad [cp]2	Viscosidad [cp]3	Viscosidad Promedio	Viscosidad Absoluta	Torque [dina/cm]1	Torque [dina/cm]2	Torque [dina/cm]3	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla absoluta	Estrés cortante 1 [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante 2 [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante 3 [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante Promedio	Estrés cortante Absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau
1	137000	140000	130000	135666,6667	1	22,2	22,8	22,2	22,4	0,1046666667	0,052405891	0,013157895	44,52988763	45,7333981	44,52988763	44,93105778	0,224373957	39,79199331	44,22531074	80,09568311	62,64833427	134391,031
2	80083	81283	88781	83382,3333	0,614611794	26,1	26,2	29,4	27,23333333	0,2093333333	0,104811782	0,026315789	52,35270572	52,5532908	58,97201334	54,62600329	0,27278798	51,40747563	54,43135451	81,83136622	68,18389601	130765,291
3	63386	59587	64386	62453,3333	0,460341523	31,4	29,2	32,1	30,9	0,314	0,157217673	0,039473684	62,98371493	58,57084318	64,38781049	61,98078953	0,30951586	59,71617726	61,9115081	83,56704933	72,59036241	125312,679
4	51589	48290	52039	50639,3333	0,373262899	34,5	32,1	34,1	33,56666667	0,4186666667	0,209623564	0,052631579	69,20185239	64,38781049	68,39951207	67,32972498	0,336227045	66,41357547	68,03528683	85,30273244	76,41236605	118694,122
5	44870	42231	45590	44230,3333	0,326022113	36,9	35,1	38,1	36,7	0,5233333333	0,262029455	0,065789474	74,0158943	70,40536287	76,42291525	73,61472414	0,367612688	72,12155992	73,31460395	87,03841555	79,86086578	111530,873
6	39592	36892	40591	39025,3333	0,287653563	40,1	36,8	40,4	39,1	0,628	0,314435346	0,078947368	80,43461684	73,81530922	81,03637208	78,42876604	0,391652755	77,14762875	78,00580093	88,77409865	83,04405414	104304,163
7	36907	33936	36764	35869,3333	0,264390663	42,1	39,3	42,7	41,36666667	0,7326666667	0,366841237	0,092105263	84,44631843	78,8299362	85,6498289	82,97536118	0,414357262	81,66941048	82,25839524	90,50978176	86,02620245	97333,5132

8	33518	31268	33893	32893	0,242454 545	44,3	41,3	45,1	43,56666 667	0,837333 333	0,419247 128	0,105263 158	88,85919 017	82,84163 779	90,46387 081	87,38823 292	0,436393 99	85,80003 107	86,16836 355	92,24546 487	88,84918 706	90800,8 765
9	30503	28997	30127	29875,66 667	0,220213 759	47,1	43,2	45,7	45,33333 333	0,942	0,471653 019	0,118421 053	94,47557 24	86,65275 43	91,66738 128	90,93190 266	0,454090 15	89,61656 68	89,80153 54	93,98114 798	91,54209 535	84789,2 143
10	29214	26934	27654	27934	0,205901 72	48,3	44,7	46,5	46,5	1,046666 667	0,524058 91	0,131578 947	96,88259 335	89,66153 049	93,27206 192	93,27206 192	0,465776 294	93,17420 479	93,20531 875	95,71683 109	94,12610 569	79318,0 504
11	27776	25249	25631	26218,66 667	0,193257 985	50,4	46,5	46,7	47,86666 667	1,151333 333	0,576464 801	0,144736 842	101,0948 8	93,27206 192	93,67323 208	96,01339 134	0,479465 776	96,51399 485	96,41515 789	97,45251 42	96,61720 601	74370,1 367
12	25944	24095	25545	25194,66 667	0,185710 074	51	48,2	49,5	49,56666 667	1,256	0,628870 692	0,157894 737	102,2983 905	96,68200 827	99,28961 43	99,42333 769	0,496494 157	99,66740 832	99,45835 153	99,18819 731	99,02781 738	69909,2 727
13	24918	22841	23394	23717,66 667	0,174823 096	53,1	49,1	50,3	50,83333 333	1,360666 667	0,681276 583	0,171052 632	106,5106 772	98,48727 398	100,8942 949	101,9640 82	0,509181 97	102,6591 735	102,3564 387	100,9238 804	101,3678 176	65891,3 117
14	23369	21575	22452	22465,33 333	0,165592 138	54,5	50,8	51,6	52,3	1,465333 333	0,733682 474	0,184210 526	109,3188 683	101,8972 203	103,5019 01	104,9059 965	0,523873 122	105,5091 208	105,1267 581	102,6595 635	103,6452 155	62270,5 222
15	22075	20676	21275	21342	0,157312 039	55	52,3	52,8	53,36666 667	1,57	0,786088 365	0,197368 421	110,3217 937	104,9059 965	105,9089 219	107,0455 707	0,534557 596	108,2334 283	107,7835 045	104,3952 466	105,8666 116	59003,0 024
16	21220	19983	20433	20545,33 333	0,151439 803	57	53,1	54,1	54,73333 333	1,674666 667	0,838494 256	0,210526 316	114,3334 953	106,5106 772	108,5165 28	109,7869 001	0,548247 078	110,8454 902	110,3384 684	106,1309 297	108,0375 222	56048,3 231
17	20431	18949	19902	19760,66 667	0,145656 02	57,2	54,4	54,4	55,33333 333	1,779333 333	0,890900 147	0,223684 211	114,7346 654	109,1182 832	109,1182 832	110,9904 106	0,554257 095	113,3565 374	112,8015 661	107,8666 129	110,1626 131	53370,1 471
18	19629	18063	18862	18851,33 333	0,138953 317	58,1	54,7	56,2	56,33333 333	1,884	0,943306 038	0,236842 105	116,5399 311	109,7200 384	112,7288 146	112,9962 614	0,564273 79	115,7760 919	115,1812 288	109,6022 96	112,2458 731	50936,2 886
19	18975	17617	18217	18269,66 667	0,134665 848	59,1	56	58,4	57,83333 333	1,988666 667	0,995711 929	0,25	118,5457 819	112,3276 445	117,1416 864	116,0050 376	0,579298 831	118,1123 065	117,4846 946	111,3379 791	114,2907 438	48718,4 861
20	18326	17306	17756	17796	0,131174 447	61,5	57,4	59,2	59,36666 667	2,093333 333	1,048117 82	0,263157 895	123,3598 238	115,1358 356	118,7463 67	119,0806 755	0,594657 763	120,3722 222	119,7182 305	113,0736 622	116,3002 192	46692,0 456
21	17682	16654	17182	17172,66 667	0,126579 853	62,1	58	60,7	60,26666 667	2,198	1,100523 71	0,276315 789	124,5633 343	116,3393 461	121,7551 432	120,8859 412	0,603672 788	122,5619 676	121,8873 041	114,8093 453	118,2769 231	44835,4 43
22	17015	16224	16905	16714,66 667	0,123203 931	63,2	59,4	61,2	61,26666 667	2,302666 667	1,152929 601	0,289473 684	126,7697 702	119,1475 372	122,7580 686	122,8917 92	0,613689 482	124,6869 138	123,9967 184	116,5450 284	120,2231 706	43129,9 307
23	16875	15857	16405	16379	0,120729 73	63,5	60,7	62,1	62,1	2,407333 333	1,205335 492	0,302631 579	127,3715 254	121,7551 432	124,5633 343	124,5633 343	0,622036 728	126,7517 985	126,0507 189	118,2807 115	122,1410 162	41559,1 736
24	16476	15472	16292	16080	0,118525 799	65,1	61,8	63,1	63,33333 333	2,512	1,257741 383	0,315789 474	130,5808 867	123,9615 791	126,5691 561	127,0372 17	0,634390 651	128,7608 244	128,0530 796	120,0163 946	124,0322 934	40108,9 214
25	15909	15117	15669	15565	0,114729 73	66,1	63,6	64,8	64,83333 333	2,616666 667	1,310147 274	0,328947 368	132,5867 375	127,5721 105	129,9791 314	130,0459 931	0,649415 693	130,7177 392	130,0071 724	121,7520 777	125,8986 465	38766,7 212
26	15478	14789	15181	15149,33 333	0,111665 848	66,5	64,1	65,9	65,5	2,721333 333	1,362553 165	0,342105 263	133,3890 778	128,5750 359	132,1855 673	131,3832 27	0,656093 489	132,6259 009	131,9160 243	123,4877 608	127,7415 57	37521,6 68
27	15098	14275	14841	14738	0,108633 907	68,2	64,2	66,8	66,4	2,826	1,414959 056	0,355263 158	136,7990 241	128,7756 21	133,9908 33	133,1884 927	0,665108 514	134,4883 315	133,7823 644	125,2234 439	129,5623 649	36364,1 903
28	14890	14183	14675	14582,66 667	0,107488 943	69,1	66,1	68,4	67,86666 667	2,930666 667	1,467364 947	0,368421 053	138,6042 899	132,5867 375	137,2001 943	136,1304 072	0,679799 666	136,3077 621	135,6086 634	126,9591 271	131,3622 875	35285,8 659
29	14356	13942	14417	14238,33 333	0,104950 86	69,1	66,9	69,4	68,46666 667	3,035333 333	1,519770 838	0,381578 947	138,6042 899	134,1914 181	139,2060 451	137,3339 177	0,685809 683	138,0866 695	137,3971 658	128,6948 102	133,1424 343	34279,2 652
30	14017	13577	14190	13928	0,102663 391	70	68	71,3	69,76666 667	3,14	1,572176 729	0,394736 842	140,4095 556	136,3978 54	143,0171 616	139,9415 237	0,698831 386	139,8273 086	139,1499 179	130,4304 930	134,9038 196	33337,8 169
31	13855	13391	13913	13719,66 667	0,101127 764	70,9	68,7	71,3	70,3	3,244666 667	1,624582 62	0,407894 737	142,2148 213	137,8019 495	143,0171 616	141,0113 108	0,704173 623	141,5317 383	140,8687 916	132,1661 764	136,6473 742	32455,6 937
32	13197	13215	13310	13240,66 667	0,097597 052	71,3	70,4	71,5	71,06666 667	3,349333 333	1,676988 511	0,421052 632	143,0171 616	141,2118 959	143,4183 318	142,5491 298	0,711853 088	143,2018 445	142,5555 036	133,9018 595	138,3739 543	31627,7 149
33	12961	12815	13019	12931,66 667	0,095319 41	71,5	70,8	72	71,43333 333	3,454	1,729394 402	0,434210 526	143,4183 318	142,0142 362	144,4212 572	143,2846 084	0,715525 876	144,8393 595	144,2116 335	135,6375 426	140,0843 495	30849,2 626
34	12738	12597	12880	12738,33 333	0,093894 349	71,8	71,5	73,2	72,16666 667	3,558666 667	1,781800 293	0,447368 421	144,0200 87	143,4183 318	146,8282 781	144,7555 656	0,722871 452	146,4458 789	145,8386 381	137,3732 257	141,7792 902	30116,2 104

35	12560	12443	12874	12625,66 667	0,093063 882	73,1	72,3	75,1	73,5	3,663333 333	1,834206 184	0,460526 316	146,6276 93	145,0230 124	150,6393 946	147,4300 334	0,736227 045	148,0228 757	147,4378 64	139,1089 088	143,4594 535	29424,8 621
36	12131	12241	12681	12351	0,091039 312	73,7	72,9	75,5	74,0	3,768	1,886612 075	0,473684 211	147,8312 035	146,2265 229	151,4417 349	148,4998 204	0,741569 282	149,5717 135	149,0105 596	140,8445 919	145,1254 684	28771,8 988
37	12062	12097	12222	12127	0,089388 206	74,5	74,8	75,8	75,0	3,872666 667	1,939017 966	0,486842 105	149,4358 842	150,0376 394	152,0434 902	150,5056 712	0,751585 977	151,0936 567	150,5578 841	142,5802 750	146,7779 204	28154,3 336
38	11776	11855	12019	11883,33 333	0,087592 138	75,1	74,9	77,2	75,7	3,977333 333	1,991423 857	0,5	150,6393 946	150,2382 245	154,8516 813	151,9097 668	0,758597 663	152,5898 808	152,0809 162	144,3159 581	148,4173 558	27569,4 723
39	11628	11736	11844	11736	0,086506 143	75,8	76,1	78,1	76,6	4,082	2,043829 748	0,513157 895	152,0434 902	152,6452 454	156,6569 47	153,7818 942	0,767946 578	154,0614 806	153,5806 619	146,0516 413	150,0442 852	27014,8 793
40	11628	11398	11802	11609,33 333	0,085572 482	77,3	76,9	79,5	77,9	4,186666 667	2,096235 639	0,526315 789	155,0522 664	154,2499 261	159,4651 381	156,2557 769	0,780300 501	155,5094 773	155,0580 611	147,7873 244	151,6591 866	26488,3 484
41	11354	11339	11799	11497,33 333	0,084746 929	78,1	77,6	79,9	78,5	4,291333 333	2,148641 53	0,539473 684	156,6569 47	155,6540 216	160,2674 784	157,5261 49	0,786644 407	156,9348 259	156,5139 931	149,5230 075	153,2625 083	25987,8 768
42	11062	11240	11705	11335,66 667	0,083555 283	78,3	78,5	82,1	79,6	4,396	2,201047 421	0,552631 579	157,0581 172	157,4592 873	164,6803 502	159,7325 849	0,797662 771	158,3384 203	157,9492 823	151,2586 906	154,8546 716	25511,6 43
43	10979	11091	11509	11193	0,082503 686	78,6	79,1	82,5	80,0	4,500666 667	2,253453 312	0,565789 474	157,6598 724	158,6627 978	165,4826 905	160,6017 869	0,802003 339	159,7210 988	159,3647 026	152,9943 737	156,4360 726	25057,9 869
44	10825	10961	11261	11015,66 667	0,081196 56	80,1	80,2	82,6	80,9	4,605333 333	2,305859 203	0,578947 368	160,6686 486	160,8692 337	165,6832 756	162,4070 526	0,811018 364	161,0836 489	160,7609 819	154,7300 568	158,0070 847	24625,3 933
45	10691	10771	11090	10850,66 667	0,079980 344	80,1	80,6	83,2	81,3	4,71	2,358265 094	0,592105 263	160,6686 486	161,6715 74	166,8867 861	163,0756 695	0,814357 262	162,4268 114	162,1388 053	156,4657 399	159,5680 601	24212,4 76
46	10406	10690	11051	10715,66 667	0,078985 258	80,2	80,7	83,2	81,3	4,814666 667	2,410670 985	0,605263 158	160,8692 337	161,8721 591	166,8867 861	163,2093 929	0,815025 042	163,7512 839	163,4988 189	158,2014 23	161,1193 315	23817,9 652
47	10195	10466	11050	10570,33 333	0,077914 005	80,4	81,9	83,3	81,8	4,919333 333	2,463076 876	0,618421 053	161,2704 038	164,2791 8	167,0873 711	164,2123 183	0,820033 389	165,0577 244	164,8416 328	159,9371 061	162,6612 138	23440,6 955
48	10178	10420	11015	10537,66 667	0,077673 219	82,6	84,1	83,4	83,3	5,024	2,515482 767	0,631578 947	165,6832 756	168,6920 518	167,2879 562	167,2210 945	0,835058 431	166,3467 545	166,1678 236	161,6727 05	164,1940 05	23079,5 958
50	10161	10292	9970	10141	0,074749 386	85,2	85,3	83,7	84,7	5,233333 333	2,620294 549	0,657894 737	170,8984 876	171,0990 727	167,8897 115	169,9624 239	0,848747 913	168,8749 026	168,7724 907	165,1441 555	167,2334 304	22402,0 389
49	10172	10412	11006	10530	0,077616 708	84,1	87,3	83,9	85,1	5,128666 667	2,567888 658	0,644736 842	168,6920 518	175,1107 743	168,2908 816	170,6979 026	0,852420 701	167,6189 618	167,4779 372	163,4084 708	165,7179 878	22733,6 801
51	10057	10276	9963	10098,66 667	0,074437 346	85,7	88,3	84	86	5,338	2,672700 44	0,671052 632	171,9014 13	177,1166 251	168,4914 667	172,5031 683	0,861435 726	170,1151 04	170,0519 746	166,8798 386	168,7405 88	22083,8 329
53	9677	10244	9745	9888,666 667	0,072889 435	86,7	90,5	84,1	87,1	5,547333 333	2,777512 222	0,697368 421	173,9072 638	181,5294 969	168,6920 518	174,7096 042	0,872454 09	172,5502 643	172,5675 741	170,3512 048	171,7310 061	21484,6 786
52	9944	10258	9921	10041	0,074012 285	86,4	90,7	84,4	87,1	5,442666 667	2,725106 331	0,684210 526	173,3055 086	181,9306 67	169,2938 07	174,8433 275	0,873121 87	171,3400 662	171,3168 548	168,6155 217	170,2397 029	21778,2 857
54	9645	10198	9631	9824,666 667	0,072417 69	86,9	91,4	84,4	87,5	5,652	2,829918 113	0,710526 316	174,3084 34	183,3347 626	169,2938 07	175,6456 679	0,877128 548	173,7461 497	173,8045 539	172,0868 879	173,2147 177	21202,3 45
55	9271	9958	9576	9601,666 667	0,070773 956	86,9	91,5	84,9	87,7	5,756666 667	2,882324 004	0,723684 211	174,3084 34	183,5353 476	170,2967 324	176,0468 38	0,879131 886	174,9281 522	175,0281 953	173,8225 71	174,6910 477	20930,6 663
56	9244	9919	9180	9447,666 667	0,069638 821	87	92,3	85	88,1	5,861333 333	2,934729 895	0,736842 105	174,5090 191	185,1400 283	170,4973 175	176,7154 549	0,882470 785	176,0966 811	176,2388 808	175,5582 541	176,1601 963	20669,0 675
57	9156	9819	9082	9352,333 333	0,068936 118	87,2	92,6	85,9	88,5	5,966	2,987135 786	0,75	174,9101 892	185,7417 835	172,3025 832	177,6515 187	0,887145 265	177,2521 265	177,4369 755	177,2939 372	177,6223 552	20417,0 133
58	9102	9805	9019	9308,666 667	0,068614 251	88,2	93	86,8	89,3	6,070666 667	3,039541 677	0,763157 895	176,9160 4	186,5441 238	174,1078 489	179,1893 376	0,894824 708	178,3948 606	178,6228 276	179,0296 203	179,0777 075	20174,0 051
59	9090	9791	8998	9293	0,068498 771	88,4	93,8	87,7	89,9	6,175333 333	3,091947 568	0,776315 789	177,3172 102	188,1488 045	175,9131 146	180,4597 098	0,901168 614	179,5252 389	179,7967 703	180,7653 034	180,5264 285	19939,5 777
62	8414	9317	8398	8709,666 667	0,064199 017	88,7	94,2	87,8	90,2	6,489333 333	3,249165 24	0,815789 474	177,9189 654	188,9511 448	176,1136 997	180,9946 033	0,903839 733	182,8455 622	183,2502 585	185,9723 528	184,8344 482	19283,5 772
60	8818	9648	8703	9056,333 333	0,066754 3	88,5	95,3	87,9	90,5	6,28	3,144353 459	0,789473 684	177,5177 953	191,1575 807	176,3142 848	181,6632 202	0,907178 631	180,6436 01	180,9591 219	182,5009 865	181,9686 861	19713,2 97

61	8654	9460	8650	8921,333 333	0,065759 214	88,6	95,7	88,6	90,96666 667	6,384666 667	3,196759 35	0,802631 579	177,7183 803	191,9599 21	177,7183 803	182,4655 606	0,911185 309	181,7502 718	182,1101 873	184,2366 697	183,4046 412	19494,7 568
63	8406	9198	8374	8659,333 333	0,063828 01	88,9	96,5	88,7	91,36666 667	6,594	3,301571 131	0,828947 368	178,3201 356	193,5646 016	177,9189 654	183,2679 009	0,915191 987	183,9297 701	184,3796 153	187,7080 359	186,2582 553	19079,4 024
64	8314	9101	8364	8593	0,063339 066	89,1	96,7	89,5	91,76666 667	6,698666 667	3,353977 022	0,842105 263	178,7213 057	193,9657 718	179,5236 461	184,0702 412	0,919198 664	185,0031 808	185,4985 26	189,4437 19	187,6762 047	18881,8 987
65	8306	8825	8350	8493,666 667	0,062606 88	90,3	96,8	90,7	92,6	6,803333 333	3,406382 913	0,855263 158	181,1283 267	194,1663 569	181,9306 67	185,7417 835	0,927545 91	186,0660 68	186,6072 484	191,1794 021	189,0884 332	18690,7 528
69	8077	8539	8078	8231,333 333	0,060673 219	93,7	96,9	91,3	93,96666 667	7,222	3,616006 477	0,907894 737	187,9482 194	194,3669 419	183,1341 775	188,4831 129	0,941235 392	190,2174 844	190,9450 601	198,1221 345	194,6826 959	17984,1 207
66	8271	8804	8300	8458,333 333	0,062346 437	91,7	97,1	91,5	93,43333 333	6,908	3,458788 804	0,868421 053	183,9365 178	194,7681 121	183,5353 476	187,4133 258	0,935893 155	187,1186 946	187,7060 297	192,9150 852	190,4950 723	18505,6 707
67	8148	8695	8160	8334,333 333	0,061432 432	92,1	97,2	91,8	93,7	7,012666 667	3,511194 695	0,881578 947	184,7388 581	194,9686 972	184,1371 029	187,9482 194	0,938564 274	188,1613 128	188,7951 078	194,6507 683	191,8962 486	18326,3 756
68	8134	8562	8098	8264,666 667	0,060918 919	92,7	97,4	92	94,03333 333	7,117333 333	3,563600 586	0,894736 842	185,9423 686	195,3698 673	184,5382 73	188,6168 363	0,941903 172	189,1941 65	189,8747 113	196,3864 514	193,2920 84	18152,6 073
70	7981	8501	8050	8177,333 333	0,060275 184	93,9	97,6	92,9	94,8	7,326666 667	3,668412 368	0,921052 632	188,3493 896	195,7710 375	186,3435 388	190,1546 553	0,949582 638	191,2314 952	192,0063 661	199,8578 176	196,0681 973	17820,6 846
71	7917	8305	8040	8087,333 333	0,059611 794	94,5	97,7	92,9	95,03333 333	7,431333 333	3,720818 259	0,934210 526	189,5529	195,9716 226	186,3435 388	190,6226 871	0,951919 866	192,2364 132	193,0588 331	201,5935 007	197,4486 975	17662,0 809
72	7907	7985	8020	7970,666 667	0,058751 843	96,1	97,8	94,5	96,13333 333	7,536	3,773224 15	0,947368 421	192,7622 613	196,1722 077	189,5529	192,8291 23	0,962938 23	193,2324 464	194,1026 577	203,3291 839	198,8243 016	17508,1 04
73	7879	7906	8018	7934,333 333	0,058484 029	97,1	97,8	94,7	96,53333 333	7,640666 667	3,825630 041	0,960526 316	194,7681 121	196,1722 077	189,9540 702	193,6314 633	0,966944 908	194,2197 952	195,1380 296	205,0648 67	200,1951 115	17358,5 592
74	7831	7865	7998	7839,333 333	0,058216 216	97,8	98,1	95,5	97,13333 333	7,745333 333	3,878035 932	0,973684 211	196,1722 077	196,7739 629	191,5587 508	194,8349 738	0,972954 925	195,1986 525	196,1651 314	206,8005 501	201,5612 252	17213,2 627
75	7822	7831	7865	7790,666 667	0,057425 061	99,9	99,7	99,9	99,83333 333	7,954666 667	3,930441 823	0,986842 105	196,7739 629	198,3786 435	197,3757 181	197,5094 415	0,986310 518	196,1692 049	197,1841 398	208,5362 332	202,9227 376	17072,0 405
76	7751	7802	7819	7790,666 667	0,057425 061	99,9	99,7	99,9	99,83333 333	7,954666 667	3,982847 714	1	200,3844 943	199,9833 242	200,3844 943	200,2507 709	1	197,1316 32	198,1952 252	210,2719 163	204,2797 405	16934,7 277

**Tabla 15.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 3% MO.

RP M	Datos Experimentales									Datos Calculados				Modelos Matemáticos					
	Viscosida d 1 [cp]	Viscosida d 2 [cp]	Viscosida d 3 [cp]	Viscosidad Promedio	Viscosidad Absoluta	Torque 1 [dina/cm ]	Torque 2 [dina/cm ]	Torque 3 [dina/cm ]	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla Absoluta	Estrés cortante Promedio [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante Absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau
1	168000	139000	115000	140666,666 7	1	20,7	22,5	19	20,7333333 3	0,10466666 7	0,05240589 1	0,01492537 3	41,5879731 3	0,20816599 7	45,7632630 7	40,4262047 3	84,6310189 5	67,8637060 7	138982,03 9
2	96579	93880	95645	95368	0,574875	26,3	31,3	24,7	27,4333333 3	0,20933333 3	0,10481178 2	0,02985074 6	55,0271734 5	0,27543507 4	58,0537766 9	54,6874635 7	86,4720379	73,6067577 5	134264,36 2
3	75785	73184	74384	74451	0,45110119	28,9	35,9	30,2	31,6666666 7	0,314	0,15721767 3	0,04477611 9	63,5186084 8	0,31793842 3	66,7213766 3	64,4489778 3	88,3130568 5	78,1717051 7	127355,70 3
4	61637	60587	61387	61203,6666 7	0,36688690 5	30,7	40,2	34,9	35,2666666 7	0,41866666 7	0,20962356 4	0,05970149 3	70,7396713 3	0,35408299 9	73,6451197 3	72,0996978 2	90,1540758	82,1268209 5	119246,48 8
5	52309	51390	52039	51912,6666 7	0,31136309 5	36,5	42	38,5	39	0,52333333 3	0,26202945 5	0,07462686 6	78,2281809 6	0,39156626 5	79,5066562 4	78,4863106 9	91,9950947 5	85,6922207 9	110779,58 9
6	47090	43891	46550	45843,6666 7	0,28029761 9	39,7	43,2	41,9	41,6	0,628	0,31443534 6	0,08955223 9	83,4433930 3	0,41767068 3	84,6405530 9	84,0179846 1	93,8361137	88,9807931 2	102530,70 5

7	43362	40449	41991	41934	0,25810714 3	41,6	47,3	44,5	44,4666666 7	0,73266666 7	0,36684123 7	0,10447761 2	89,1934986 4	0,44645247 7	89,2389868 2	88,9269752 7	95,6771326 5	92,0595992 6	94824,255 8
8	39227	37192	38649	38356	0,23349404 8	44,8	48,8	46,5	46,7	0,83733333 3	0,41924712 8	0,11940298 5	93,6732320 8	0,46887550 2	93,4237868 5	93,3591045 1	97,5181516	94,9723331 2	87802,690 2
9	36259	33529	35317	35035	0,21582738 1	47,5	50,2	47,2	48,3	0,942	0,47165301 9	0,13432835 8	96,8825933 5	0,48493975 9	97,2776370 6	97,4125341 9	99,3591705 5	97,7493446 4	81496,257 8
10	33893	31673	32193	32586,3333 3	0,20174404 8	49,7	52,7	48	50,1333333 3	1,04666666 7	0,52405891 1	0,14925373 1	100,559986 5	0,50334672 1	100,859540 1	101,156817 2	101,200189 5	100,412731 4	75874,512 1
11	31466	29666	28014	29715,3333 3	0,18729761 9	51,9	53,9	49,1	51,6333333 3	1,15133333 3	0,57646480 1	0,16417910 4	103,568762 7	0,51840696 1	104,213253 1	104,643212 9	103,041208 4	102,979175 4	70878,912 5
12	30394	27844	27049	28429	0,18091666 7	55,3	55,8	52,1	54,4	1,256	0,62887069 2	0,17910447 8	109,118283 2	0,54618473 9	107,372233 5	107,910695 2	104,882227 4	105,461636 8	66441,493
13	29440	26856	26444	27580	0,17523809 5	55,9	56	53,9	55,2666666 7	1,36066666 7	0,68127658 3	0,19402985 1	110,856687 2	0,55488621 2	110,362706 4	110,989658 6	106,723246 3	107,870422 1	62494,664
14	28668	24509	24964	26047	0,17064285 7	56,2	56,1	55,1	55,8	1,46533333 3	0,73368247 4	0,20895522 4	111,926474 3	0,56024096 4	113,205655 9	113,904310 2	108,564265 3	110,213887 8	58975,835 2
15	27554	23155	24100	24936,3333 3	0,16401190 5	56,7	56,9	57	56,8666666 7	1,57	0,78608836 5	0,22388059 5	114,066048 5	0,57095046 9	115,918166 6	116,674274 3	110,405284 2	112,498920 9	55829,191 4
16	27182	22120	22915	24072,3333 3	0,16179761 9	58,1	57,7	58,1	57,9666666 7	1,67466666 7	0,83849425 6	0,23880597 2	116,272484 4	0,58199464 5	118,514356 2	119,315703	112,246303 2	114,731277 1	53005,995 7
17	25900	21184	22045	23043	0,15416666 7	62,1	59,9	60,5	60,8333333 3	1,77933333 3	0,89090014 7	0,25373134 3	122,02259	0,61077643 9	121,006041 3	121,842065 5	114,087322 1	116,915824 9	50464,187 4
18	25361	20299	21842	22500,6666 7	0,15095833 3	64,5	61,4	61,7	62,5333333 3	1,884	0,94330603 8	0,26865671 6	125,432536 3	0,62784471 2	123,403224 3	124,264723 8	115,928341 1	119,056722 1	48167,690 3
19	24092	20203	20762	21685,6666 7	0,14340476 2	64,9	63,9	61,9	63,5666666 7	1,98866666 7	0,99571192 9	0,28358209 8	127,505248 8	0,63821954 5	125,714455 7	126,593358 7	117,76936	121,157571 6	46085,643 3
20	22855	19286	19259	20466,6666 7	0,13604166 7	65,2	64	63,9	64,3666666 7	2,09333333 3	1,04811782	0,29850746 4	129,109929 4	0,64625167 3	127,947109 2	128,836293 1	119,610379	123,221485 5	44191,658 1
21	22782	18055	19196	20011	0,13560714 3	66,7	64	64,5	65,0666666 7	2,198	1,10052371 6	0,31343283 6	130,514025	0,65327978 6	130,107593 9	131,000740 1	121,451397 9	125,251205 4	42463,148 2
22	21650	17860	18625	19378,3333 3	0,12886904 8	67,1	64,9	66,3	66,1	2,30266666 7	1,15292960 1	0,32835820 9	132,586737 5	0,66365461 8	132,201519 7	133,092995 7	123,292416 9	127,249147	40880,742 8
23	20709	17819	18051	18859,6666 7	0,12326785 7	67,4	65,5	68,5	67,1333333 3	2,40733333 3	1,20533549 2	0,34328358 2	134,65945	0,67402945 1	134,233828 5	135,118591 7	125,133435 8	129,217453 8	39427,786 5
24	19821	17646	18000	18489	0,11798214 3	68,2	67,9	69,8	68,6333333 3	2,512	1,25774138 3	0,35820895 5	137,668226 2	0,68908969 2	136,208898 8	137,082416 9	126,974454 8	131,158039 1	38089,916 2
25	19340	16892	17846	18026	0,11511904 8	69,1	70,2	70	69,7666666 7	2,61666666 7	1,31014727 4	0,37313432 8	139,941523 7	0,70046854 1	138,130630 6	138,988815 4	128,815473 7	133,072618 5	36854,706 1
26	18850	16355	17108	17437,6666 7	0,11220238 1	72,1	71,3	72,1	71,8333333 3	2,72133333 3	1,36255316 5	0,38805970 1	144,086948 7	0,72121820 6	140,002514 7	140,841666 5	130,656492 6	134,962737 6	35711,370 9
27	18372	16085	16543	17000	0,10935714 3	74	72	73,9	73,3	2,826	1,41495905 6	0,40298507 5	147,028863 2	0,73594377 5	141,827689 3	142,644449 9	132,497511 6	136,829794 8	34650,517 7
28	18103	15725	16677	16835	0,10775595 2	76	72,7	73,9	74,2	2,93066666 7	1,46736494 7	0,41791044 8	148,834128 9	0,74497992	143,608987 4	144,400300 2	134,338530 6	138,675060 2	33663,938 8
29	18079	15679	15575	16444,3333 3	0,10761309 5	76,3	73,7	74,1	74,7	3,03533333 3	1,51977083 8	0,43283582 1	149,837054 3	0,75	145,348976	146,112052 3	136,179549 5	140,499691 3	32744,438 5
30	17636	15097	15369	16034	0,10497619 7	76,6	75,1	75,3	75,6666666 7	3,14	1,57217672 9	0,44776119 4	151,776043 4	0,75970548 9	147,049989 6	147,782278 3	138,020568 5	142,304746 7	31885,687 7
31	17416	15094	15297	15935,6666 7	0,10366666 7	76,8	75,6	75,9	76,1	3,24466666 7	1,62458262 7	0,46268656 7	152,645245 4	0,76405622 5	148,714158 1	149,413321 3	139,861587 4	144,091197 4	31082,102 2
32	16834	14509	15229	15524	0,10020238 1	76,9	76,1	76,2	76,4	3,34933333 3	1,67698851 1	0,47761194 1	153,247000 7	0,76706827 3	150,343430 6	151,007321 3	141,702606 4	145,859936 7	30328,739 6
33	16397	13341	14561	14766,3333 3	0,09760119 3	76,9	77,5	77	77,1333333 3	3,454	1,72939440 2	0,49253731 3	154,717957 9	0,77443105 8	151,939596 1	152,566238 8	143,543625 3	147,611788 7	29621,212 4



61	9534	8467	9763	9254,66666 7	0,05675	95,8	87,6	96	93,1333333 3	6,38466666 7	3,19675935	0,91044776 1	186,811570 6	0,93507362 8	187,604038 4	186,765006 6	195,092155 9	191,894473 8	19373,585 4
62	9412	8888	9586	9295,33333 3	0,05602381	96,2	88,1	96,7	93,6666666 7	6,48933333 3	3,24916524	0,92537313 4	187,881357 7	0,94042838	188,653910 3	187,754903 5	196,933174 9	193,353558 5	19184,055 7
63	9293	8360	9512	9055	0,05531547 6	96,8	89,5	96,9	94,4	6,594	3,30157113 1	0,94029850 7	189,352315 7	0,94779116 5	189,692718 3	188,733496 9	198,774193 8	194,806382 8	19000,842 1
64	9045	8314	9357	8905,33333 3	0,05383928	97	90,2	96,9	94,7	6,69866666 7	3,35397702 2	0,95522388 1	189,954070 2	0,95080321 3	190,720752 1	189,701092 2	200,615212 8	196,253095 3	18823,641 9
65	8923	8399	9204	8842	0,05311309 5	97,5	90,8	98,9	95,7333333 3	6,80333333 3	3,40638291 3	0,97014925 4	192,026782 7	0,96117804 6	191,738289	190,657982 2	202,456231 7	197,693838 5	18652,171
66	8896	8344	9037	8759	0,05295238 1	98,1	97,2	99,8	98,3666666 7	6,908	3,45878880 4	0,98507462 7	197,308856 4	0,98761713 5	192,745595 3	191,604447 1	204,297250 7	199,128749 7	18486,162 8
67	8888	8810	9012	8903,33333 3	0,05290476	99	99,9	99,9	99,6	7,01266666 7	3,51119469	1	199,782739	1	193,742926	192,540756 1	206,138269 6	200,557961 1	18325,366 9

**Tabla 16.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 5% MO.

RPM	Datos Experimentales										Datos Calculados					Modelos Matemáticos				
	Viscosidad 1 [cp]	Viscosidad 2 [cp]	Viscosidad 3 [cp]	Viscosidad Promedio	Visc. Abs	Torque 1 [dina/cm]	Torque 2 [dina/cm]	Torque 3 [dina/cm]	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla Absoluta	Estrés cortante Promedio [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante Absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau	
1	150000	151000	169000	156667	1	24,8	25	25,4	25,06666667	0,105	0,052	0,022	50,280	0,251	42,1925993	46,9522897	75,4376693	60,4563713	152689,284	
2	90345	92380	89681	90802	0,579587234	25	28,5	29,1	27,53333333	0,209	0,105	0,044	55,228	0,276	55,9908068	58,9082344	78,5453387	68,1194575	142372,141	
3	76784	65186	67586	69852	0,44586383	30,5	31,9	33,3	31,9	0,314	0,157	0,067	63,987	0,319	66,0689154	67,9242334	81,653008	74,3095076	129071,072	
4	61687	53089	55938	56905	0,363221277	35,9	35,2	37,3	36,13333333	0,419	0,210	0,089	72,478	0,362	74,3014296	75,4410007	84,7606773	79,737058	115570,65	
5	54238	47630	50389	50752	0,323951064	41,4	39,1	41,6	40,7	0,523	0,262	0,111	81,638	0,407	81,3871493	82,0091115	87,8683467	84,6773291	103308,892	
6	49549	43491	45190	46077	0,294106383	43,7	42,9	44,9	43,83333333	0,628	0,314	0,133	87,923	0,439	87,6753729	87,9083888	90,976016	89,2714707	92735,044	
7	46490	40363	41305	42719	0,272676596	47	47,8	47,9	47,56666667	0,733	0,367	0,156	95,412	0,476	93,3695576	93,3039108	94,0836853	93,6033322	83812,8464	
8	44562	38092	38692	40449	0,258182979	51,8	51,2	51,4	51,46666667	0,837	0,419	0,178	103,234	0,515	98,6001587	98,3026285	97,1913547	97,7275461	76331,3899	
9	41466	36396	36725	38196	0,243802128	55,8	54,8	54,8	55,13333333	0,942	0,472	0,200	110,589	0,552	103,456569	102,978476	100,299024	101,68206	70048,2497	
10	40191	34493	33737	36140	0,230682979	56,2	57	56,6	56,6	1,047	0,524	0,222	113,531	0,567	108,003115	107,385059	103,406693	105,494504	64743,0321	
11	37912	32066	32339	34106	0,217695745	56,8	57,5	57,9	57,4	1,151	0,576	0,244	115,136	0,575	112,287852	111,562701	106,514363	109,185737	60231,67	
12	36374	29044	29394	31604	0,20172766	57,1	57,5	58,8	57,8	1,256	0,629	0,267	115,938	0,579	116,347771	115,542622	109,622032	112,771962	56365,7802	
13	34093	26717	27087	29299	0,187014894	58,9	57,5	58,8	58,4	1,361	0,681	0,289	117,142	0,585	120,212037	119,349579	112,729701	116,266066	53027,3954	
14	32532	26094	26347	28324	0,180793617	60	59,8	60,1	59,96666667	1,465	0,734	0,311	120,284	0,600	123,904119	123,003589	115,837371	119,678499	50123,0416	

15	31566	24475	24235	26759	0,1708	62	60,1	60,5	60,86666667	1,570	0,786	0,333	122,089	0,609	127,443219	126,521106	118,94504	123,017871	47578,4941
16	29794	23395	22470	25220	0,160976596	63,1	63,3	60,7	62,36666667	1,675	0,838	0,356	125,098	0,624	130,845279	129,915852	122,052709	126,291378	45334,5166
17	28494	23501	22725	24907	0,158978723	67,1	66,8	64,1	66	1,779	0,891	0,378	132,386	0,661	134,123702	133,199405	125,160379	129,505108	43343,5262
18	26959	22795	21795	23850	0,152231915	67,6	68,4	66,1	67,36666667	1,884	0,943	0,400	135,127	0,674	137,289878	136,381647	128,268048	132,664266	41567,0257
19	26328	22006	21406	23247	0,148382979	68,9	68,4	67,3	68,2	1,989	0,996	0,422	136,799	0,683	140,353582	139,471083	131,375717	135,773339	39973,6368
20	26110	20966	21265	22780	0,145406383	70	69,6	70,1	69,9	2,093	1,048	0,444	140,209	0,700	143,323276	142,475102	134,483387	138,836236	38537,5946
21	25555	20396	20910	22287	0,142257447	70,7	70,1	72,2	71	2,198	1,101	0,467	142,415	0,711	146,206337	145,400169	137,591056	141,856378	37237,5911
22	25309	19414	20341	21688	0,138434043	71,2	70,1	73,7	71,66666667	2,303	1,153	0,489	143,753	0,717	149,009247	148,251975	140,698725	144,836786	36055,8817
23	24758	18413	20291	21154	0,135025532	72,4	71,8	77,2	73,8	2,407	1,205	0,511	148,032	0,739	151,73773	151,035567	143,806395	147,780141	34977,5915
24	24647	18496	18476	20540	0,131104255	73,4	73,1	78,9	75,13333333	2,512	1,258	0,533	150,706	0,752	154,396876	153,755439	146,914064	150,688834	33990,173
25	23795	18452	19892	20713	0,132210638	74,8	76,9	80,2	77,3	2,617	1,310	0,556	155,052	0,774	156,99123	156,415618	150,021733	153,565011	33082,9785
26	23359	18250	19496	20368	0,130010638	75,1	77,6	84,1	78,93333333	2,721	1,363	0,578	158,328	0,790	159,524871	159,019727	153,129403	156,410604	32246,9219
27	22072	17685	19351	19703	0,125761702	75,5	79,1	86,3	80,3	2,826	1,415	0,600	161,070	0,804	162,001475	161,571037	156,237072	159,227362	31474,2084
28	20564	17739	19193	19165	0,122331915	79,1	82,1	86,5	82,56666667	2,931	1,467	0,622	165,616	0,826	164,424371	164,072517	159,344741	162,016873	30758,1171
29	19934	17500	18079	18504	0,118112766	82,5	84,9	87,9	85,1	3,035	1,520	0,644	170,698	0,852	166,796581	166,526871	162,452411	164,780583	30092,826
30	19856	17477	18056	18463	0,117848936	86,1	87,5	89,9	87,83333333	3,140	1,572	0,667	176,181	0,879	169,12086	168,936565	165,56008	167,519818	29473,2687
31	19368	17087	17048	17834	0,11383617	88,5	87,9	90	88,8	3,245	1,625	0,689	178,120	0,889	171,399727	171,303864	168,667749	170,23579	28895,018
32	19197	16759	16328	17428	0,111242553	88,5	88,3	90,2	89	3,349	1,677	0,711	178,521	0,891	173,635492	173,630844	171,775419	172,929616	28354,1896
33	18854	15560	15653	16689	0,106525532	88,6	88,3	90,6	89,16666667	3,454	1,729	0,733	178,855	0,893	175,830282	175,919421	174,883088	175,602328	27847,3627
34	18231	15700	14785	16239	0,103651064	88,9	89	90,9	89,6	3,559	1,782	0,756	179,724	0,897	177,986054	178,171365	177,990757	178,254877	27371,5138
35	17943	15700	14688	16110	0,102831915	89,3	93,3	90,9	91,16666667	3,663	1,834	0,778	182,867	0,913	180,104621	180,388315	181,098427	180,888148	26923,9612
36	17176	15013	14444	15544	0,099219149	89,6	93,5	91	91,36666667	3,768	1,887	0,800	183,268	0,915	182,187662	182,571791	184,206096	183,50296	26502,3192
37	16821	14818	14508	15382	0,098185106	89,6	93,6	91,3	91,5	3,873	1,939	0,822	183,535	0,916	184,236733	184,723209	187,313765	186,100078	26104,4584
38	16396	14775	14144	15105	0,096414894	90,1	94	91,6	91,9	3,977	1,991	0,844	184,338	0,920	186,253287	186,843886	190,421435	188,680214	25728,4728
39	16183	14720	13981	14961	0,095497872	91,5	97,1	92,7	93,76666667	4,082	2,044	0,867	188,082	0,939	188,238674	188,935054	193,529104	191,244035	25372,6517
40	15987	14362	13802	14717	0,093938298	92,3	97,5	93,1	94,3	4,187	2,096	0,889	189,152	0,944	190,194157	190,997866	196,636773	193,792164	25035,4553
41	15429	13300	13605	14111	0,09007234	93,1	97,8	94,9	95,26666667	4,291	2,149	0,911	191,091	0,954	192,120917	193,033399	199,744443	196,325186	24715,4945



42	15190	13654	13511	14118	0,090117021	95,1	98	96,8	96,63333333	4,396	2,201	0,933	193,832	0,967	194,020063	195,042668	202,852112	198,84365	24411,513
43	14981	12960	13670	13870	0,088534043	96,8	98,2	97,5	97,5	4,501	2,253	0,956	195,570	0,976	195,892633	197,026625	205,959781	201,348074	24122,3716
44	14575	12809	13606	13663	0,087212766	98,7	98,6	98,7	98,66666667	4,605	2,306	0,978	197,911	0,988	197,739606	198,986167	209,067451	203,838944	23847,0355
45	14149	12578	13279	13335	0,085119149	99,9	99,9	99,9	99,9	4,710	2,358	1,000	200,384	1,000	199,5619	200,922138	212,17512	206,31672	23584,5627

**Tabla 17.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 7% MO.

RP M	Datos Experimentales										Datos Calculados					Modelos Matemáticos				
	Viscosidad 1 [cp]	Viscosidad 2 [cp]	Viscosidad 3 [cp]	Viscosidad Promedio	Viscosidad Absoluta	Torque 1 [dina/cm]	Torque 2 [dina/cm]	Torque 3 [dina/cm]	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla Absoluta	Estrés cortante Promedio [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante Absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau	
1	103000	121000	117000	113666,6667	0,68519061	17	20,3	19,2	18,83333333	0,1046666667	0,05240589	0,01960784	37,77685662	0,18908969	40,3597775	40,8225648	74,0634817	58,9330773	111434,906	
2	68385	86682	78583	77883,3333	0,55533431	22,5	29,1	25,8	25,8	0,2093333333	0,10481178	0,03921568	51,75095048	0,25903614	53,1517879	53,4417238	76,6769635	65,7817940	105469,305	
3	55588	70185	63596	63123	0,41410557	26,6	35,2	31,4	31,06666666	0,314	0,15721767	0,05882352	62,315098	0,31191432	62,4397744	62,6309037	79,2904453	71,2922079	97398,904	
4	46190	59367	54288	53281,6666	0,37440469	30,9	39,2	35,9	35,33333333	0,4186666667	0,20962356	0,07843137	70,87339472	0,35475234	69,9982193	70,1228392	81,9039271	76,1098651	88769,1558	
5	40671	52909	47630	47070	0,34127859	33,8	43,9	39,8	39,16666666	0,5233333333	0,26202945	0,09803921	78,56248943	0,39323962	76,4855949	76,5619670	84,5174089	80,4848128	80552,3423	
6	36791	47790	43091	42557,3333	0,28655718	36,6	48,1	43,1	42,6	0,628	0,31443534	0,11764705	85,44924382	0,42771084	82,2300283	82,2699064	87,1308907	84,5452901	73184,158	
7	33079	43534	39763	38792	0,22774486	38,9	50,5	46,1	45,16666666	0,7326666667	0,36684123	0,13725490	90,59759419	0,45348058	87,4221946	87,4337675	89,7443724	88,3674771	66770,7764	
8	30369	39891	36367	35542,3333	0,21850733	40,6	52,3	47,9	46,93333333	0,8373333333	0,41924712	0,15686274	94,14126393	0,47121820	92,1841183	92,1734064	92,3578542	92,0010093	61260,7542	
9	28527	35929	33260	32572	0,21850733	42,5	54,1	49,5	48,7	0,942	0,47165301	0,17647058	97,68493367	0,48895582	96,5992797	96,5708856	94,9713360	95,4803636	56544,6181	
10	26574	33293	30833	30233,3333	0,25204105	44,7	55	50,9	50,2	1,0466666666	0,52405891	0,19607843	100,6937099	0,50401606	100,727664	100,685212	97,5848178	98,8306425	52502,7014	
11	25195	31630	29121	28648,6666	0,23681231	46,1	57,9	53,3	52,43333333	1,1513333333	0,57646480	0,21568627	105,1734433	0,52643909	104,614031	104,560443	100,198299	102,070796	49024,7461	
12	23695	30014	27044	26917,6666	0,22774486	47,1	59,3	55,1	53,83333333	1,256	0,62887069	0,23529411	107,9816344	0,54049531	108,292792	108,230469	102,811781	105,215547	46016,0614	
13	22703	28517	26441	25887	0,21850733	49,1	61,1	56,9	55,7	1,3606666666	0,68127658	0,25490196	111,7258892	0,55923694	111,791057	111,722000	105,425263	108,276604	43397,9247	
14	21724	27507	25280	24837	0,21004105	50,7	63,1	59,6	57,8	1,4653333333	0,73368247	0,27450980	115,9381759	0,58032128	115,130613	115,056515	108,038745	111,263459	41105,8461	
15	21115	26194	24315	23874,6666	0,18507333	52,5	64,1	60,7	59,1	1,57	0,78608836	0,29411764	118,5457819	0,59337349	118,329277	118,251584	110,652226	114,183936	39087,2824	

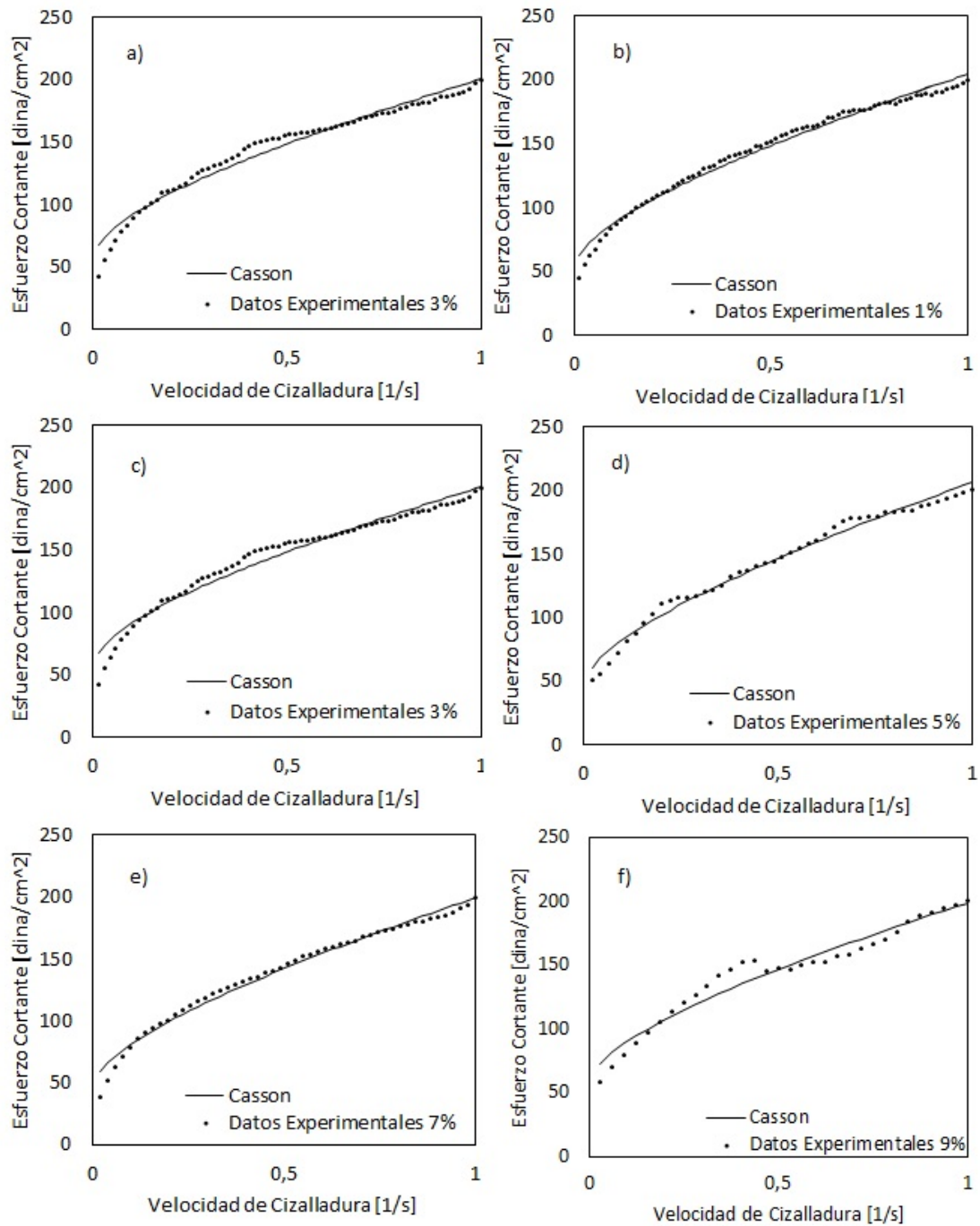
16	20058	24707	23500	22755	0,20019061 6	54,1	65,9	61,9	60,6333333 3	1,67466666 7	0,83849425 6	0,31372549 121,6214198	0,60876840 7	121,401826 5	121,321787 7	113,265708 5	117,044572 8	37299,437 7
17	19408	24101	22689	22066	0,19412903 2	54,7	68,1	63	61,9333333 3	1,77933333 3	0,89090014 7	0,33333333 3	0,62182061 6	124,360676 3	124,279377 3	115,879190 3	119,850900 1	35707,365 3
18	18696	23528	21529	21251	0,18695894 4	56,2	70,1	63,9	63,4	1,884	0,94330603 8	0,35294117 6	0,63654618 5	127,216371 1	127,134762 9	118,492672 1	122,607645 8	34282,406 5
19	18122	22890	20743	20585	0,18109970 7	57,4	70,1	65,1	64,2	1,98866666 7	0,99571192 9	0,37254902 128,775621	0,64457831 3	129,977953 2	129,896875 7	121,106153 9	125,318889 1	33000,938 5
20	17636	21805	19766	19735,6666 7	0,17362756 6	59,1	72,6	65,3	65,6666666 7	2,09333333 3	1,04811782 3	0,39215686 3	0,65930388 2	132,653244 9	132,573442 4	123,719635 7	127,988178 6	31843,380 2
21	17139	21281	19196	19205,3333 3	0,16896187 7	60,2	73,9	67	67,0333333 3	2,198	1,10052371 1	0,41176470 6	0,67302543 5	135,249063 7	135,171200 3	126,333117 4	130,618624 7	30793,406 7
22	16715	20314	18544	18524,3333 3	0,16297067 4	61,3	74	67,4	67,5666666 7	2,30266666 7	1,15292960 1	0,43137254 9	0,67838018 7	137,771393 9	137,696064 2	128,946599 2	133,212971 1	29837,329 5
23	16532	19822	17944	18099,3333 3	0,15923167 2	63,9	74,9	68,9	69,2333333 3	2,40733333 3	1,20533549 2	0,45098039 2	0,69511378 8	140,225520 3	140,153259 1	131,560081 1	135,773653 1	28963,605 4
24	16172	19076	17696	17648	0,15526099 7	64,3	74,9	70,5	69,9	2,512	1,25774138 3	0,47058823 5	0,70180722 9	142,616137 9	142,547427 3	134,173562 8	138,302843 9	28162,446 6
25	15789	18620	17208	17205,6666 7	0,15136950 1	66,2	76,1	71	71,1	2,61666666 7	1,31014727 3	0,49019607 8	0,71385542 2	144,947435 2	144,882714 4	136,787044 4	140,802492 6	27425,509 5
26	15666	18227	16866	16919,6666 7	0,14885337 2	68,2	78,9	72,1	73,0666666 7	2,72133333 3	1,36255316 5	0,50980392 2	0,73360107 1	147,223174 3	147,162840 1	139,400526 4	143,274354 7	26745,645 9
27	15336	17885	16174	16465	0,14485337 2	69,4	80,5	72,7	74,2	2,826	1,41495905 6	0,52941176 5	0,74497992 6	149,446741 6	149,391156 4	142,014008 1	145,720019 1	26116,701 6
28	15211	17953	16025	16396,3333 3	0,14424926 7	70,7	82,5	74,4	75,8666666 7	2,93066666 7	1,46736494 7	0,54901960 8	0,76171352 1	151,621201 4	151,570696 3	144,627489 9	148,140928 5	25533,353 6
29	14976	17045	15390	15803,6666 7	0,13903519 1	72,3	82,6	75,1	76,6666666 7	3,03533333 3	1,51977083 7	0,56862745 1	0,76974564 9	153,749335 8	153,704214 1	147,240971 7	150,538397 7	24990,978 7
30	14577	16956	15097	15543,3333 3	0,13674486 8	73,8	83,9	75,1	77,6	3,14	1,57217672 9	0,58823529 4	0,77911646 6	155,833679 7	155,79422 5	149,854453 5	152,913629 2	24485,540 7
31	14378	16583	14803	15254,6666 7	0,13420527 9	74,3	84,9	77,1	78,7666666 7	3,24466666 7	1,62458262 7	0,60784313 7	0,79082998 7	157,876550 3	157,843008 7	152,467935 7	155,267726 2	24013,508 7
32	14172	16084	14801	15019	0,13213196 5	75,8	85	78,3	79,7	3,34933333 3	1,67698851 3	0,62745098 159,8663083	0,80020080 3	159,880071 9	159,852684 5	155,081417 1	157,601703 5	23571,775 8
33	14015	15688	14270	14657,6666 7	0,12895307 9	76,9	86,1	78,2	80,4	3,454	1,72939440 2	0,64705882 4	0,80722891 6	161,846197 6	161,825182 5	157,694898 8	159,916497 7	23157,601 4
34	13656	15350	14009	14338,3333 3	0,12614369 5	77	86,7	79,8	81,1666666 7	3,55866666 7	1,78180029 3	0,66666666 7	0,81492637 2	163,776727 6	163,762286 5	160,308380 6	162,212972 6	22768,559 1
35	13266	14968	13797	14010,3333 3	0,12325806 5	77,8	87,1	80,1	81,6666666 7	3,66333333 3	1,83420618 4	0,68627451 163,8111482	0,81994645 2	165,673325 9	165,665645 5	162,921862 4	164,491932 7	22402,493 6
36	13197	14497	13697	13797	0,12138123 2	79,5	89,8	82,1	83,8	3,768	1,88661207 5	0,70588235 3	0,84136546 2	167,537533 3	167,536787 2	165,535344 2	166,754122 7	22057,484 6
37	13003	14456	13554	13671	0,12027272 7	79,8	90,5	83,1	84,4666666 7	3,87266666 7	1,93901796 6	0,72549019 6	0,84805890 2	169,370780 3	169,377128 9	169,000236 9	169,000236 9	21731,815 9
38	12881	14286	13308	13491,6666 7	0,11869501 5	81,7	90,8	83,5	85,3333333 3	3,97733333 3	1,99142385 9	0,74509803 9	0,85676037 5	171,174397 6	171,187990 8	170,762307 7	171,230922 7	21423,949 7
39	12700	14228	13090	13339,3333 3	0,11735483 9	83,1	90,9	83,9	85,9666666 7	4,082	2,04382974 7	0,76470588 2	0,86311914 3	172,949625 3	172,970602 5	173,375789 5	173,446785 2	21132,504 1
40	12582	14202	13002	13262	0,11667448 7	83	92,3	85	86,7666666 7	4,18666666 7	2,09623563 9	0,78431372 5	0,87115127 2	174,697621 5	174,726112 4	175,989271 3	175,648391 1	20856,234 1
41	12202	13563	12729	12831,3333 3	0,11288563 9	84,2	92,3	86,5	87,6666666 7	4,29133333 3	2,14864153 1	0,80392156 9	0,88018741 6	176,419469 3	176,455595 2	178,602753 3	177,836271 9	20594,015 5
42	12112	13340	12426	12626	0,11107917 9	85	92,9	88,2	88,7	4,396	2,20104742 1	0,82352941 2	0,89056224 9	178,116183 8	178,160057 6	181,216234 9	180,010926 6	20344,830 4

43	12061	13197	12109	12455,6666 7	0,10958064 5	86,5	93,9	88,2	89,5333333 3	4,50066666 7	2,25345331 2	0,84313725 5	179,5905078	0,89892905	179,788717 4	179,840444 7	183,829716 7	182,172824 9	20107,755 5
44	11800	12897	12105	12267,3333 3	0,10792375 4	86,8	94,5	88,5	89,9333333 3	4,60533333 3	2,30585920 3	0,86274509 8	180,3928481	0,91265060 4	181,437965 2	181,497644 9	186,443198 5	184,322409 4	19881,951 2
45	11651	12797	12100	12182,6666 7	0,10717888 6	87,1	94,9	90,7	90,9	4,71	2,35826509 4	0,88235294 1	182,3318372	0,91265060 2	183,064769 9	183,132494 4	189,056680 2	186,460097 4	19666,652 7
46	11515	12350	11906	11923,6666 7	0,10490029 3	88,6	95,1	91,6	91,7666666 7	4,81466666 7	2,41067098 5	0,90196078 4	184,0702412	0,92135207 5	184,669925 6	184,745781 5	191,670162 5	188,586283 5	19461,161 6
47	11423	12227	11895	11848,3333 3	0,10423753 7	89,8	95,5	91,9	92,4	4,91933333 3	2,46307687 6	0,92156862 7	185,3406134	0,92771084 3	186,254181 9	186,338250 2	194,283643 8	190,701340 7	19264,839 3
48	11423	12210	11335	11656	0,10254545 5	92	96,5	92	93,5	5,024	2,51548276 7	0,94117647 1	187,5470492	0,93875502 1	187,818247 1	187,910603 9	196,897125 6	192,805622 4	19077,100 6
49	11532	12181	11326	11679,6666 7	0,10275366 6	93,9	97,1	94,6	95,2	5,12866666 7	2,56788865 8	0,96078431 4	190,9569956	0,95582329 3	189,362791 2	189,463507 7	199,510607 4	194,899463 6	18897,408 2
50	11206	11949	11311	11488,6666 7	0,10107331 4	94,2	99,8	94,8	96,2666666 7	5,23333333 3	2,62029454 9	0,98039215 7	193,0965698	0,96653279 8	190,888449	190,997592	202,124089 1	196,983182 3	18725,268 2
51	11609	10900	11198	11235,6666 7	0,09884750 7	99	99,9	99,9	99,6	5,338	2,67270044	1	199,7827391	1	192,395822 3	192,513454 6	204,737570 9	199,057080 8	18560,225 7

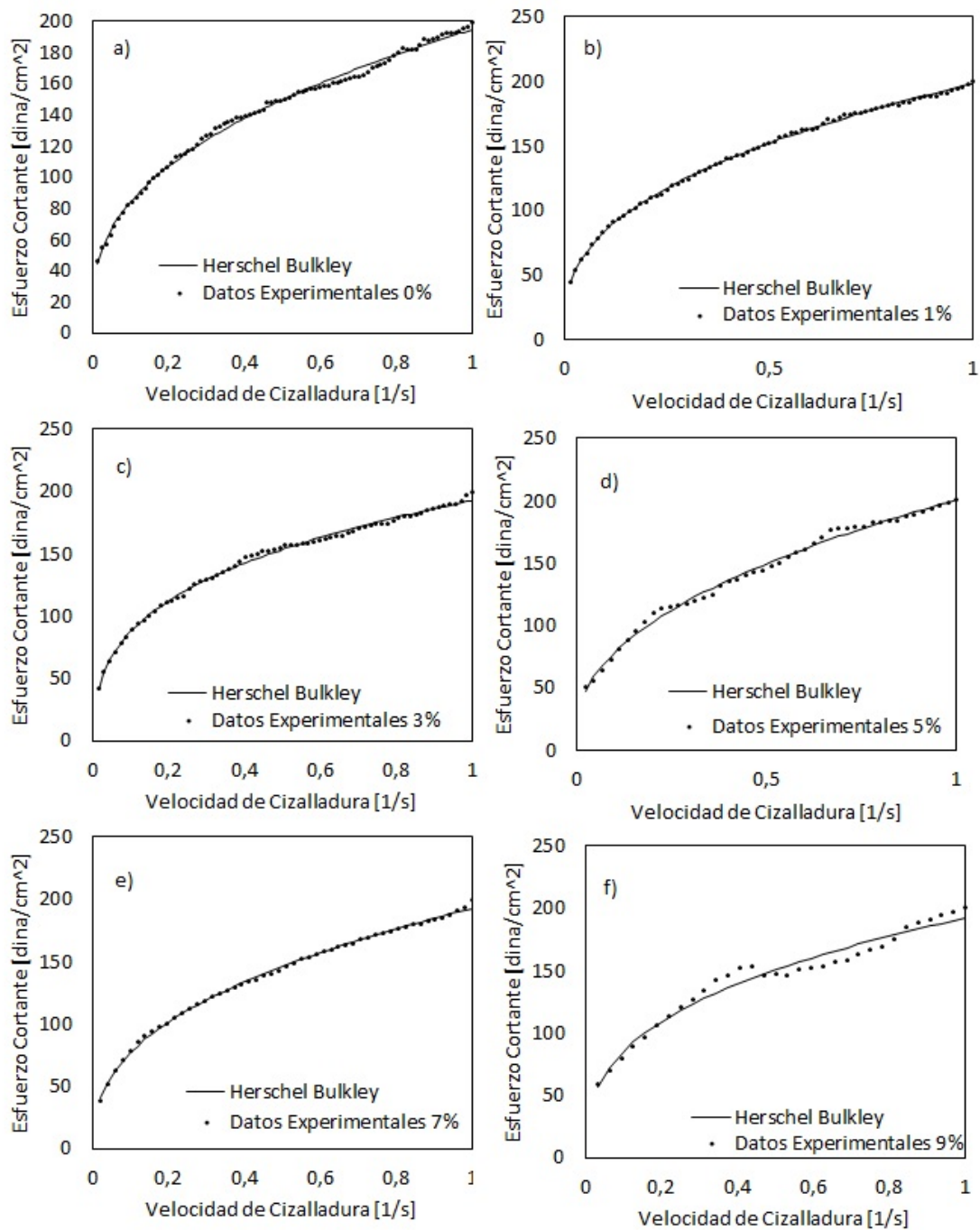
**Tabla 18.** Parámetros de viscosidad experimentales y cálculos de velocidad de corte y esfuerzo cortante para la formulación de 9% MO.

Datos Experimentales										Datos Calculados					Modelos Matemáticos				
RPM	Viscosidad 1 [cp]	Viscosidad 2 [cp]	Viscosidad 3 [cp]	Viscosidad Promedio	Viscosidad Absoluta	Torque 1 [dina/cm]	Torque 2 [dina/cm]	Torque 3 [dina/cm]	Torque Promedio	Velocidad Angular [rad/s]	Velocidad de cizalla [1/s]	Velocidad de cizalla Absoluta	Estrés cortante Promedio [dina/cm <sup>2</sup> ]	Estrés cortante absoluto	Ley de Potencia	Herschel Bulkley	Bingham	Casson	Carreau
1	218000	169000	157000	181333,333 3	1	34,5	27,8	25,9	29,4	0,10466666 7	0,05240589 1	0,03125	58,97201334	0,29429429 4	56,8546610 4	56,992817 4	85,680999 3	72,697877 1	172710,09 7
2	119000	105000	99679	107893	0,59499816 2	37,9	34,5	32,9	35,1	0,20933333 3	0,10481178 2	0,0625	70,40536287	0,35135135 1	72,519920 6	72,588467 3	89,481998 5	81,367387 5	152885,27 1
3	82782	82582	78183	81182,3333 3	0,44769669 1	39,9	39,9	38,3	39,3666666 7	0,314	0,15721767 3	0,09375	78,96365959	0,39406072 7	83,614762 5	83,647103 8	93,282997 8	88,350787 7	131407,97 8
4	65086	68985	66586	66885,6666 7	0,36885477 9	42,9	46	44,2	44,3666666 7	0,41866666 7	0,20962356 4	0,125	88,99291356	0,44411077 7	92,501537 5	92,511588 4	97,083997 1	94,461394 1	112924,42 5
5	55908	60707	58188	58267,6666 7	0,32132904 4	46,5	50	47,9	48,1333333 3	0,52333333 3	0,26202945 5	0,15625	96,54828488	0,48181514 8	100,04008 6	100,03543 9	100,88499 1	100,01423 7	98211,940 2
6	51789	54888	51589	52755,3333 3	0,29093014 7	52,8	54,8	50,4	52,6666666 7	0,628	0,31443534 6	0,1875	105,6414751	0,52719386 1	106,65337 2	106,63876 8	104,68599 6	105,17088 3	86717,601 8
7	48616	51503	46876	48998,3333 3	0,27021139 7	56,4	59,4	54,5	56,7666666 7	0,73266666 7	0,36684123 7	0,21875	113,8654634	0,56823490 2	112,58476 1	112,56341 6	108,48699 5	110,02731 1	77697,566 7
8	45215	47465	43866	45515,3333 3	0,25100367 6	59,7	62,7	57,8	60,0666666 7	0,83733333 3	0,41924712 8	0,25	120,484771	0,60126793 5	117,98874 5	117,96296 5	112,28799 4	114,64605 4	70528,277 1
9	42858	44490	41125	42824,3333 3	0,23616360 3	64,2	63,7	61,7	63,2	0,942	0,47165301 9	0,28125	126,7697702	0,63263263 3	122,9703	122,94180 6	116,08899 3	119,07055 1	64743,368 1
10	41871	40191	40071	40711	0,22450919 1	69,1	63,9	67,5	66,8333333 3	1,04666666 7	0,52405891 3	0,3125	134,0576947	0,66900233 6	127,60441 1	127,57452 9	119,88999 3	123,33242 8	60004,966 7
11	39973	38337	38174	38828	0,214125	73,8	69,1	69,6	70,8333333 3	1,15133333 3	0,57646480 1	0,34375	142,0810979	0,70904237 6	131,94673 9	131,91651 3	123,69099 2	127,45556 2	56069,018 3
12	37042	38822	37892	37918,6666 7	0,20911029 4	73,9	69,1	75,9	72,9666666 7	1,256	0,62887069 2	0,375	146,3602463	0,73039706 4	136,03987 5	136,01014 6	127,49199 1	131,45849 5	52757,735 1

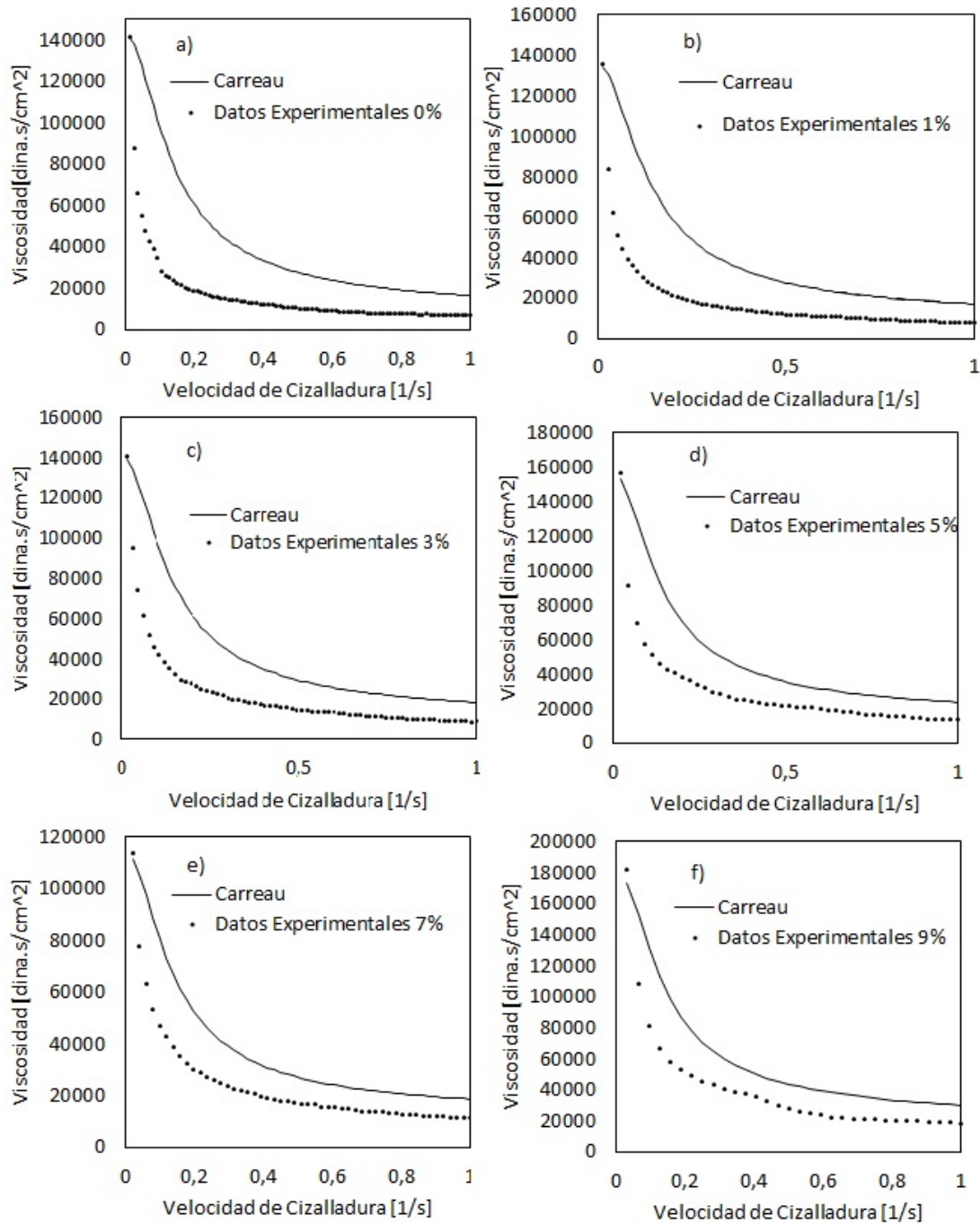
13	35669	34337	36408	35471,3333 3	0,19561397 1	78,7	70,3	77,9	75,6333333 3	1,36066666 7	0,68127658 3	0,40625	151,7091817	0,75709042 4	139,91723	139,88868 4	131,29299 1	135,35598 5	49939,911 9
14	34364	30765	33895	33008	0,18202941 2	80,1	71,1	78	76,4	1,46533333 3	0,73368247 4	0,4375	153,2470007	0,76476476 5	143,60555 6	143,57876 1	135,09399	139,15998 9	47517,311
15	31993	27154	30673	29940	0,16511029 4	73,7	71,1	73	72,6	1,57	0,78608836 5	0,46875	145,6247676	0,72672672 7	147,12664 4	147,10207 5	138,89498 9	142,88036 4	45415,301 6
16	28194	26732	28901	27942,3333 3	0,15409375 3	75,2	70,1	75,4	73,5666666 7	1,67466666 7	0,83849425 6	0,5	147,5637567	0,73640307 7	150,49851 5	150,47657 3	142,69598 8	146,52534 8	43576,388 6
17	26394	26604	25792	26263,3333 3	0,14483455 9	74,7	72,5	71	72,7333333 3	1,77933333 3	0,89090014 7	0,53125	145,8922144	0,72806139 5	153,73625 7	153,71728 4	146,49698 8	150,10190 8	41955,691 6
18	26061	25828	23095	24994,6666 7	0,13783823 5	77,8	77,3	70	75,0333333 3	1,884	0,94330603 8	0,5625	150,5056712	0,75108441 8	156,85265 2	156,83694 5	150,29798 7	153,616	40517,744 7
19	25605	24500	22603	24236	0,13365441 2	79,2	77,3	71	75,8333333 3	1,98866666 7	0,99571192 9	0,59375	152,1103519	0,75909242 6	159,85862 7	159,84642 9	154,09898 6	157,07276 5	39234,202 7
20	23725	22075	21205	22335	0,12317095 6	78,1	77,5	73	76,2	2,09333333 3	1,04811782	0,625	152,8458305	0,76272672 3	162,76361 2	162,75514 8	157,89998 5	160,47667 3	38082,172 4
21	22509	21595	21195	21766,3333 3	0,12003492 6	81,3	77,9	75,7	78,3	2,198	1,10052371	0,65625	157,0581172	0,78378378 4	165,57580 8	165,57126 7	161,70098 5	163,83164 3	37042,985 1
22	22459	21032	20841	21444	0,11825735 3	82,6	78	76,3	78,9666666 7	2,30266666 7	1,15292960 1	0,6875	158,395351	0,79045712 4	168,30239 3	168,30194 3	165,50198 4	167,14113 1	36101,28
23	21908	20895	20653	21152	0,11664705 9	85	80,1	78,4	81,1666666 7	2,40733333 3	1,20533549 2	0,71875	162,8082228	0,81247914 6	170,94969 5	170,95348 2	169,30298 3	170,40820 5	35244,314 2
24	21390	20071	20471	20644	0,11384558 8	86,9	82,1	80,4	83,1333333 3	2,512	1,25774138 3	0,75	166,7530627	0,83216549 9	173,52332 3	173,53147 5	173,10398 3	173,63560 5	34461,435 1
25	21619	20060	19218	20299	0,11194301 5	87,5	85,1	80,7	84,4333333 3	2,61666666 7	1,31014727 4	0,78125	169,3606687	0,84517851 2	176,02827 2	176,04090 3	176,90498 2	176,82578 4	33743,674 7
26	21780	19750	19850	20460	0,11283088 2	88,6	88,1	85,5	87,4	2,72133333 3	1,36253316 5	0,8125	175,3113594	0,87487487 5	178,46901 7	178,48622 8	180,70598 1	179,98095 6	33083,433 2
27	21660	19743	19774	20392,3333 3	0,11245772 1	90,9	95,9	88,7	91,8333333 3	2,826	1,41495905 6	0,84375	184,2039646	0,91925258 6	180,84958 1	180,87146	184,50698	183,10312 2	32474,231
28	20888	19722	19324	19978	0,11017279 4	94,3	96	91,7	94	2,93066666 7	1,46736494 7	0,875	188,5499746	0,94094094 1	183,17359 7	183,20022 4	188,30798 4	186,19409 9	31910,511 9
29	19234	18762	19515	19170,3333 3	0,10571875 3	95,6	96,5	93,1	95,0666666 7	3,03533333 3	1,51977083 8	0,90625	190,6895488	0,95161828 5	185,44435 8	185,47580 3	192,10897 9	189,25554 4	31387,486 2
30	18954	18736	18936	18875,3333 3	0,10409191 2	96,1	97	97,7	96,9333333 3	3,14	1,57217672 9	0,9375	194,4338036	0,97030363 7	187,66486 1	187,70118 6	195,90997 8	192,28897 3	30901,004 3
31	18456	18690	18731	18625,6666 7	0,10271507 4	98,2	97,2	98,8	98,0666666 7	3,24466666 7	1,62458262 7	0,96875	196,7071012	0,98164831 5	189,83783 8	189,87909 8	199,71097 7	195,29577 4	30447,454 3
32	18245	18515	18352	18370,6666 7	0,10130882 4	99,9	99,9	99,9	99,9	3,34933333 3	1,67698851 1	1	200,3844943	1	191,96579 2	192,01203 7	203,51197 7	198,27722 7	30023,678 7



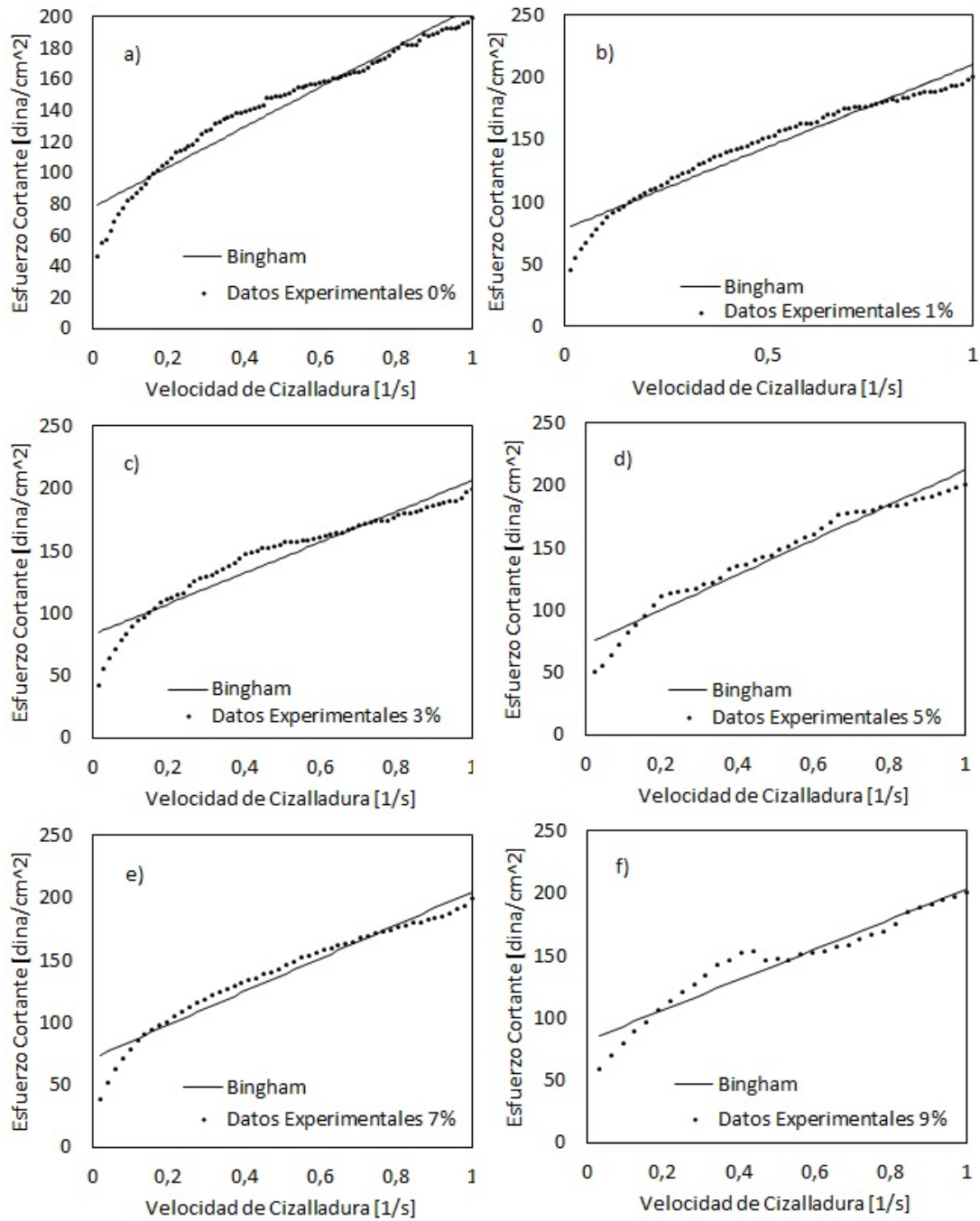
**Figura 23.** Ley de Casson **a)** Formulación 0% MO, **b)** Formulación 1% MO, **c)** Formulación 3% MO, **d)** Formulación 5% MO, **e)** Formulación 7% MO, **f)** Formulación 9% MO.



**Figura 24.** Ley de Herschel Bulkley **a)** Formulación 0% MO, **b)** Formulación 1% MO, **c)** Formulación 3% MO, **d)** Formulación 5% MO, **e)** Formulación 7% MO, **f)** Formulación 9% MO.



**Figura 25.** Ley de Carreau **a)** Formulación 0% MO, **b)** Formulación 1% MO, **c)** Formulación 3% MO, **d)** Formulación 5% MO, **e)** Formulación 7% MO, **f)** Formulación 9% MO.



**Figura 26.** Ley de Bingham a) Formulación 0% MO, b) Formulación 1% MO, c) Formulación 3% MO, d) Formulación 5% MO, e) Formulación 7% MO, f) Formulación 9% MO.



**Tabla 19.** Contenido de Fe, Ca y Na para cada una de las formulaciones

Formulación	Fe [ppm]				Promedio	Ca [ppm]			Promedio	Na [ppm]			Promedio	
0%	M1	M 1.1	0,263	0,263	0,338	0,2882	1,420	2,367	1,420	1,736	21,063	21,719	21,719	21,500
		M 1.2	0,263	0,263	0,263	0,2632	1,420	1,420	2,367	1,736	20,735	20,735	20,407	20,626
		M 1.3	0,489	0,414	0,414	0,4386	2,367	2,367	2,367	2,367	22,047	21,391	21,391	21,610
	M2	M 2.1	0,338	0,338	0,414	0,3634	2,367	1,420	1,420	1,736	20,735	20,735	21,063	20,844
		M 2.2	0,414	0,414	0,338	0,3885	1,420	1,420	1,420	1,420	20,407	20,407	20,079	20,297
		M 2.3	0,263	0,263	0,338	0,2882	1,420	1,420	1,420	1,420	21,391	21,063	20,735	21,063
	M3	M 3.1	0,414	0,338	0,338	0,3634	1,420	1,420	1,420	1,420	20,079	20,407	20,407	20,297
		M 3.2	0,263	0,263	0,263	0,2632	2,367	2,367	2,367	2,367	20,407	20,407	20,407	20,407
		M 3.3	0,263	0,263	0,263	0,2632	1,420	1,420	1,420	1,420	20,735	21,063	20,735	20,844
	<b>Promedio Total</b>				<b>0,3244</b>	<b>Promedio Total</b>	<b>1,736</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>20,832</b>			
1%	M1	M 1.1	0,489	0,414	0,414	0,4386	3,314	2,367	3,314	2,999	25,984	25,984	25,984	25,984
		M 1.2	0,263	0,338	0,263	0,2882	2,367	2,367	2,367	2,367	25,328	25,328	25,000	25,219
		M 1.3	0,414	0,338	0,338	0,3634	2,367	1,420	2,367	2,052	24,672	24,016	25,000	24,563
	M2	M 2.1	0,338	0,414	0,263	0,3383	3,314	4,261	3,314	3,630	25,984	26,312	26,312	26,203
		M 2.2	0,263	0,263	0,263	0,2632	2,367	3,314	2,367	2,683	25,328	25,000	25,000	25,109
		M 2.3	0,338	0,338	0,338	0,3383	2,367	2,367	2,367	2,367	25,000	24,672	24,672	24,781
	M3	M 3.1	0,263	0,414	0,263	0,3133	2,367	2,367	3,314	2,683	24,672	24,672	25,000	24,781
		M 3.2	0,263	0,263	0,338	0,2882	4,261	3,314	4,261	3,946	25,000	25,328	25,328	25,219
		M 3.3	0,414	0,338	0,338	0,3634	2,367	3,314	3,314	2,999	24,672	25,000	25,000	24,891
	<b>Promedio Total</b>				<b>0,3328</b>	<b>Promedio Total</b>	<b>2,858</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>25,194</b>			
3%	M1	M 1.1	0,414	0,414	0,414	0,4135	4,261	4,261	4,261	4,2614	28,281	28,609	28,609	28,500
		M 1.2	0,489	0,414	0,489	0,4637	4,261	3,314	4,261	3,9457	26,969	26,640	26,640	26,750
		M 1.3	0,338	0,414	0,338	0,3634	3,314	4,261	4,261	3,9457	26,640	26,969	26,969	26,859

	<b>M2</b>	<b>M 2.1</b>	0,338	0,338	0,263	0,3133	4,261	4,261	3,314	3,9457	28,281	28,281	28,609	28,390	
		<b>M 2.2</b>	0,414	0,414	0,338	0,3885	3,314	4,261	3,314	3,6301	26,640	26,640	26,969	26,750	
		<b>M 2.3</b>	0,263	0,263	0,263	0,2632	3,314	4,261	3,314	3,6301	26,969	26,640	26,969	26,859	
	<b>M3</b>	<b>M 3.1</b>	0,338	0,338	0,338	0,3383	4,261	4,261	4,261	4,2614	28,937	28,281	28,281	28,500	
		<b>M 3.2</b>	0,489	0,414	0,489	0,4637	3,314	4,261	4,261	3,9457	28,609	28,937	28,609	28,718	
		<b>M 3.3</b>	0,414	0,414	0,414	0,4135	4,261	3,314	4,261	3,9457	26,969	26,640	26,640	26,750	
	<b>Promedio Total</b>					<b>0,3801</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>3,9457</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>27,564</b>	
	5%	<b>M1</b>	<b>M 1.1</b>	0,414	0,489	0,414	0,4386	5,208	4,261	4,261	4,5770	28,281	28,937	28,937	28,718
			<b>M 1.2</b>	0,338	0,263	0,263	0,2882	5,208	4,261	5,208	4,8927	29,593	29,593	29,593	29,593
<b>M 1.3</b>			0,338	0,414	0,414	0,3885	5,208	4,261	5,208	4,8927	29,265	28,937	28,937	29,046	
<b>M2</b>		<b>M 2.1</b>	0,338	0,338	0,414	0,3634	5,208	5,208	5,208	5,2083	29,921	29,593	29,921	29,812	
		<b>M 2.2</b>	0,338	0,338	0,414	0,3634	5,208	4,261	5,208	4,8927	29,265	28,937	29,265	29,156	
		<b>M 2.3</b>	0,564	0,489	0,564	0,5388	4,261	5,208	4,261	4,5770	29,593	29,593	29,593	29,593	
<b>M3</b>		<b>M 3.1</b>	0,414	0,414	0,489	0,4386	5,208	5,208	5,208	5,2083	28,609	29,265	28,937	28,937	
		<b>M 3.2</b>	0,338	0,338	0,414	0,3634	4,261	4,261	4,261	4,2614	29,593	29,265	29,265	29,374	
		<b>M 3.3</b>	0,338	0,489	0,414	0,4135	5,208	6,155	5,208	5,5240	29,265	29,265	29,593	29,374	
<b>Promedio Total</b>					<b>0,3996</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>4,8927</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>29,289</b>		
7%		<b>M1</b>	<b>M 1.1</b>	0,489	0,414	0,489	0,4637	5,208	6,155	6,155	5,8396	30,249	30,577	30,577	30,468
			<b>M 1.2</b>	0,489	0,414	0,414	0,4386	6,155	5,208	5,208	5,5240	30,249	30,249	30,577	30,359
	<b>M 1.3</b>		0,564	0,414	0,414	0,4637	5,208	6,155	6,155	5,8396	29,921	29,921	30,249	30,031	
	<b>M2</b>	<b>M 2.1</b>	0,414	0,489	0,414	0,4386	5,208	4,261	6,155	5,2083	30,906	30,906	30,577	30,796	
		<b>M 2.2</b>	0,639	0,639	0,639	0,6391	4,261	4,261	5,208	4,5770	30,249	30,906	30,249	30,468	
		<b>M 2.3</b>	0,489	0,564	0,489	0,5138	6,155	6,155	6,155	6,1553	30,577	30,906	30,577	30,687	
	<b>M3</b>	<b>M 3.1</b>	0,489	0,564	0,489	0,5138	5,208	4,261	6,155	5,2083	29,921	29,921	29,921	29,921	
		<b>M 3.2</b>	0,489	0,564	0,564	0,5388	5,208	6,155	5,208	5,5240	30,577	30,577	30,906	30,687	
		<b>M 3.3</b>	0,564	0,489	0,564	0,5388	5,208	5,208	6,155	5,5240	30,249	29,921	29,921	30,031	
<b>Promedio Total</b>					<b>0,5054</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>5,4889</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>30,383</b>		

9%	M1	M 1.1	0,564	0,489	0,489	0,5138	7,102	7,102	8,049	7,4179	31,89	31,56	32,22	31,890
		M 1.2	0,564	0,564	0,489	0,5388	7,102	6,155	8,049	7,1023	33,20	33,53	33,20	33,311
		M 1.3	0,639	0,714	0,564	0,6391	8,049	7,102	6,155	7,1023	33,86	33,86	33,86	33,858
	M2	M 2.1	0,489	0,414	0,489	0,4637	7,102	7,102	8,049	7,4179	31,56	31,23	31,89	31,562
		M 2.2	0,564	0,639	0,489	0,5639	8,049	8,049	7,102	7,7336	32,22	31,89	32,22	32,108
		M 2.3	0,489	0,564	0,639	0,5639	7,102	8,049	8,049	7,7336	33,86	33,86	33,86	33,858
	M3	M 3.1	0,489	0,564	0,489	0,5138	7,102	8,049	7,102	7,4179	32,218	32,218	32,218	32,218
		M 3.2	0,714	0,714	0,639	0,6892	8,049	8,049	8,049	8,0492	33,202	33,530	33,858	33,530
		M 3.3	0,564	0,489	0,489	0,5138	8,049	7,102	8,049	7,7336	32,218	32,874	32,546	32,546
	<b>Promedio Total</b>					<b>0,5556</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>7,5231</b>	<b>Promedio Total</b>			<b>32,765</b>

