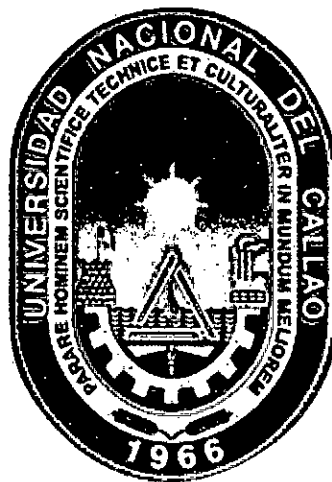


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
“COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE DISPERSIONES
ELABORADAS CON PULPA DE NÍSPERO DE PALO
(*Mespilus germánica L.*)”

Autor: CARLOS ERNESTO ANGELES QUEIROLO

(PERÍODO DE EJECUCIÓN: Del 01-01-2017 al 31-12-2018)

(Resolución de aprobación N° 089-2017-R)

Callao, 2018

ÍNDICE

	Página
I ÍNDICE	1
Tablas de contenido	3
II RESUMEN Y ABSTRACT	5
Resumen	5
Abstract	6
III INTRODUCCIÓN	7
3.1 Problema de investigación	7
3.1.1 Enunciado del problema de investigación	7
3.1.2 Objetivos de la investigación	9
3.2 Importancia y justificación de la investigación	9
3.2.1 Importancia de la investigación	10
3.2.2 Justificación de la investigación	10.
IV MARCO TEÓRICO	12
4.1 Antecedentes del estudio	12
4.2 El níspero de palo	14
4.2.1 Características botánicas	14
4.2.2 Clasificación taxonómica	15
4.2.3 Composición química del níspero	16
4.3 Reología	17
4.3.1 Viscosidad	18
4.3.2 Fluidos no newtonianos	21
4.3.3 Modelos reológicos	24
4.3.4 Importancia de la reología	27
4.4 Definición de términos básicos	27

V	MATERIALES Y MÉTODOS	29
5.1	Materiales y equipos	29
5.2	Población y muestra	31
5.3	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	31
5.3.1	Acondicionamiento de la materia prima	31
5.3.2	Formulación de las dispersiones	35
5.3.3	Pruebas experimentales reológicas	35
5.4	Procesamiento estadístico y análisis de datos	36
VI	RESULTADOS	38
6.1	Caracterización de la materia prima	38
6.2	Pruebas experimentales reológicas	38
VII	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
7.1	Contrastación de hipótesis con los resultados	52
7.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares	55
VIII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
8.1	Conclusiones	57
8.2	Recomendaciones	57
IX	REFERENCIALES	58
X	APÉNDICES	63
XI	ANEXOS	79



TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°4.1	Clasificación taxonómica del níspero de palo	16
Tabla N°4.2	Composición química del níspero de palo	17
Tabla N°4.3	Herschel-Bulkley: Valores de constantes	25
Tabla N°4.4	Modelos reológicos-Fluidos independientes del tiempo	26
Tabla N°5.1	Formulación de dispersiones	35
Tabla N°5.2	Condiciones de pruebas experimentales	36
Tabla N°6.1	Estructura física del níspero de palo	38
Tabla N°6.2	Datos experimentales dispersiones de 5°Brix	39
Tabla N°6.3	Datos experimentales dispersiones de 10°Brix	40
Tabla N°6.4	Datos experimentales dispersiones de 15°Brix	41
Tabla N°6.5	Constantes de modelos para dispersiones 5°Brix	49
Tabla N°6.6	Constantes de modelos para dispersiones 10°Brix	50
Tabla N°6.7	Constantes de modelos para dispersiones 15°Brix	50
Tabla N°6.8	Parámetros estadísticos de modelos	51
Tabla N°7.1	Constantes de modelos Herschel-Bulkley y Robertson-Stiff	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°4.1	Árbol del níspero	15
Figura N°4.2	Fruto del níspero	15
Figura N°4.3	Movimiento de un fluido	18
Figura N°4.4	Curva de fluidez	20
Figura N°4.5	Clasificación de fluidos no Newtonianos	21
Figura N°4.6	Reograma de fluidos sin umbral de fluencia	22
Figura N°4.7	Reograma de fluidos con umbral de fluencia	23
Figura N°5.1	Equipos utilizados en pruebas experimentales	30
Figura N°5.2	Diagrama de flujo	32
Figura N°5.3	Níspero de palo seleccionado	33
Figura N°5.4	Níspero de palo cocido	34
Figura N°6.1	Reogramas de dispersiones de 5°Brix	42
Figura N°6.2	Reogramas de dispersiones de 10°Brix	43
Figura N°6.3	Reogramas de dispersiones de 15°Brix	44
Figura N°6.4	Reogramas τ vs D: Concentraciones 5-15°Brix	45
Figura N°6.5	Reograma μ_a vs D: Concentraciones 5-15°Brix	46
Figura N°6.6	Reogramas τ vs D: Concentraciones 20-40°C	47
Figura N°6.7	Reograma μ_a vs D: Concentraciones 20-40°C	48

RESUMEN

En este trabajo, se ha estudiado el comportamiento reológico de dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo (*Mespilus germánica* L.) con concentraciones de 5, 10 y 15°Brix y en un rango de temperaturas de 20 a 40°C.

Los reogramas obtenidos indican que el comportamiento reológico de las dispersiones formuladas corresponde a un fluido no newtoniano pseudoplástico.

Para concentraciones de 15 °Brix, se encontró un efecto significativo en los valores de la viscosidad aparente de las dispersiones respecto a dispersiones de 5 y 10 °Brix, que no mostraron diferencias significativas entre ellas. De la misma manera, la temperatura tuvo un efecto significativo en los valores de la viscosidad aparente de las dispersiones.

Se aplicaron cinco modelos reológicos y se encontró que los resultados experimentales se ajustaron al modelo de Herschel-Bulkley, seguido del modelo de Robertson-Stiff.

Para el modelo de Herschel-Bulkley se obtuvieron los valores de n (0,244 a 0,393), k (3,020 a 5,649) y de τ_0 (-3,881 a -1,356).

Palabras clave: *Mespilus germánica* L. Comportamiento reológico. Fluido pseudoplástico



ABSTRACT

In this work, it has been studied the rheological behavior of dispersions produced with níspero de palo pulp (*Mespilus germanica* L.) at concentrations of 5, 10, and 15 ° Brix and a temperature range of 20°C to 40° C.

The obtained rheograms indicate that the rheological behavior of dispersions made is a non-Newtonian pseudoplastic fluid.

For concentrations of 15 ° Brix was found a significant effect on the values of the apparent viscosity of the dispersion, over dispersion concentrations of 5 or 10 ° Brix, which showed no significant differences between them. In the same way, the temperature had a significant effect on the values of the apparent viscosity for the dispersions.

Five rheological models were applied and it was found that the experimental results were adjusted to the model of Herschel-Bulkley, followed by the model of Robertson – Stiff.

For the Herschel-Bulkley model were obtained values of n (0,244 to 0,393), k (3,020 to 5,649) and τ_0 (-3,881 to -1,356).

Key words: *Mespilus germánica* L. Rheological behavior. Pseudoplastic fluid

III. INTRODUCCIÓN

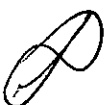
3.1 Problema de investigación

3.1.1 Enunciado del problema de investigación

Debido al incremento de la población mundial, en la actualidad existe una gran demanda de alimentos y su producción se ha incrementado grandemente. Sin embargo, dado que los alimentos necesitan de una adecuada conservación para prolongar su período de vida útil, es por esta razón que se han desarrollado muchos procedimientos que implican su transformación en una amplia variedad de productos.

En el procesamiento de alimentos como los jugos y néctares así como mermeladas y jaleas elaborados con frutas, son de gran importancia tanto las propiedades nutricionales como las sensoriales y, dentro de éstas, se tienen las propiedades reológicas. Estos alimentos procesados han de poseer la propiedad reológica que corresponda a una textura apropiada que incentive el interés del consumidor y contribuya a la aceptación del producto.

La reología tiene una gran importancia en la industria del procesamiento de frutas, que implican aplicaciones tecnológicas, sensoriales y de ingeniería. El comportamiento reológico juega un papel importante en la transferencia de momento y de calor.



El níspero de palo es una fruta de forma ovoide, con una cáscara de color variable del amarillo – naranja al anaranjado oscuro, la pulpa es amarillenta y tiene sabor agridulce. Actualmente se consume en fresco y en preparaciones caseras, y no se conoce de su transformación industrial en productos como conservas, mermeladas y jugos, por lo que está abierta la posibilidad de desarrollar proyectos para tal fin.

En muchas operaciones de la industria alimentaria es esencial conocer la viscosidad del fluido bajo tratamiento, de modo que pueda escogerse el equipamiento más apropiado. Durante algunas operaciones la viscosidad puede cambiar considerablemente. Esto ocurre en particular en aquellos procesos que implican calentamiento, homogeneización y concentración, estos cambios en la viscosidad necesitan ser tenidos en cuenta cuando se diseñan estos procesos (Roudot, 2004).

En este sentido, este trabajo se ha centrado en la caracterización de propiedades relacionadas con el comportamiento reológico de dispersiones elaboradas con diferentes concentraciones de pulpa de níspero de palo.

De acuerdo a la situación problemática planteada anteriormente se pueden identificar el siguiente problema de investigación:

Problema general:

¿Cuál es el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con la pulpa del níspero de palo?



Problemas específicos:

- ✓ ¿Cuál es la influencia de la concentración sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo?
- ✓ ¿Cuál es la influencia de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo?

3.1.2 Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Obtener los parámetros reológicos característicos de las dispersiones de pulpa de níspero de palo.

Objetivos específicos:

- ✓ Determinar el efecto de la concentración sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo.
- ✓ Determinar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo.

3.2 Importancia y justificación de la investigación

Los resultados de la investigación se pueden aplicar en beneficio de la agroindustria, que está alcanzando un notable desarrollo en muchas regiones del país, y especialmente en la sierra del Perú, en los departamentos de Junín y Ayacucho, que es donde se cultiva el



níspero de palo, pero que mayormente solo se consume en fresco y no tiene un aprovechamiento industrial. Una mayor demanda del consumo del níspero de palo significará una necesidad de un mayor cultivo y por lo tanto la generación de trabajo para la población campesina de estas regiones.

3.2.1 Importancia de la investigación

El estudio del comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo es esencial para el diseño de equipos utilizados en las plantas de procesamiento de frutas como el níspero de palo, para la elaboración de productos tales como zumos, concentrados, jaleas y mermeladas.

Diseñar un correcto procesamiento de las frutas permitirá obtener un producto de calidad y por otro lado, puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos tales como daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento. Por tanto, el resultado de esta investigación brindará un aporte tecnológico para la industria de procesamiento de alimentos

3.2.2 Justificación de la investigación

El níspero de palo se consume en mayor proporción como fruta fresca y a nivel casero para la elaboración de compotas y conservas en almíbar. Los resultados de la investigación se pueden aplicar en beneficio de las poblaciones campesinas de la sierra, ya que permitirán darle un valor agregado a este fruto.



El desarrollo de un nuevo producto a partir del níspero de palo incrementará su demanda y contribuirá al mejoramiento e incremento de su cultivo. La demanda de este nuevo producto por la industria de procesamiento de alimentos estimulará el incremento y mejora del cultivo del níspero.

Se hace necesaria la generación de nuevos métodos de utilización de esta materia prima que una parte de la producción agrícola del níspero de palo sea dirigida hacia la industrialización. Esta industrialización resultaría beneficiosa no solamente para el agricultor sino también para el consumidor y la industria, como una nueva opción de mercado.

El valor a alcanzar en el desarrollo de este trabajo de investigación consistirá en:

- ✓ Identificar el modelo matemático que describa el comportamiento reológico de las dispersiones de pulpa de níspero de palo a diferentes concentraciones y temperaturas.
- ✓ Incentivar una nueva forma de aprovechamiento del níspero de palo a escala industrial.



IV MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Existen estudios sobre las propiedades reológicas de diversas variedades de frutas en lo que corresponde a la pulpa obtenida, habiéndose evaluado el efecto de la temperatura y la concentración, utilizando productos ya elaborados que se encuentran disponibles en el mercado.

- ✓ Alvis, A., Arrazola, G. & García, C. (2016) en el trabajo "Comportamiento reológico de la pulpa de noni (*Morinda citrifolia*, L.) realizaron el estudio de las propiedades de flujo de una pulpa de noni a la temperatura de 25°C encontrando que el comportamiento reológico correspondía a un fluido pseudoplástico y que los datos experimentales se ajustaron a la ley de potencia.

- ✓ Andrade, D.; Ramírez, E.; Montes, E.; Perez, O.; Bustamante, C. & Mora, B. (2010) en el trabajo de investigación "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr)" determinaron dicho comportamiento en un rango de temperaturas de 10 a 65 °C. Los datos de viscosidad aparente se ajustaron adecuadamente a la ley de potencia de Ostwald. Se obtuvo un índice de consistencia entre 637 y 3800 Pa·s y el índice de comportamiento al flujo fue entre 0,0127 y 0,133, presentando un comportamiento pseudoplástico.

- ✓ Figueroa, J.; Barragan, K. & Salcedo, J. (2017) en el trabajo "Comportamiento reológico en pulpa edulcorada de mango" (*Mangifera indica* L. cv. *Magdalena River*)" evaluaron el comportamiento reológico de pulpas edulcoradas a temperaturas

de 10°C – 50 °C y concentraciones de sacarosa de 0 a 25 %. Se evidenció un comportamiento pseudoplástico y un ajuste al modelo de la ley de potencia.

- ✓ Marquez, L.; Pretell, C. & Siche, R. (2012) en el trabajo “Efecto de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana (*Annona muricata* L.) estudiaron las propiedades reológicas de pulpas de 15 a 30°Brix y temperaturas de 30°C – 60°C. Los resultados obtenidos mostraron el comportamiento de un fluido no newtoniano plástico y que se adecuaban al modelo de Herschel – Bulkley. La temperatura y la concentración tuvieron un efecto significativo sobre el comportamiento reológico.

- ✓ Muñoz, E.; Rubio, L. & Cabeza, M. (2012) en el trabajo de investigación “Comportamiento de flujo y caracterización físico química de pulpas de durazno” efectuaron análisis reológicos y físico-químicos de nueve variedades de pulpas de durazno. Las concentraciones de sólidos solubles fue de 12.5 – 28 °Brix y las temperaturas de 30 – 50 °C; para todas las condiciones estudiadas encontraron un comportamiento de fluido pseudoplástico, siguiendo el modelo de la Ley de Potencia.

- ✓ Ortega, F.; Salcedo, E.; Arrieta, R. y Torres, R. (2015) realizaron un estudio sobre “Efecto de la temperatura y concentración sobre las propiedades reológicas de la pulpa de mango variedad Tommy Atkins”. Evaluaron el rendimiento de pulpa con respecto al peso total del fruto que era entre 60 a 75 % y muestran los resultados del estudio del comportamiento y los parámetros reológicos de pulpa de mango concentrada, a temperaturas entre 15 y 60 °C y en el rango de concentraciones de 15 – 30 °Brix encontraron que para



las condiciones en que se realizaron los estudios, el comportamiento reológico correspondía a un fluido pseudoplástico. Así mismo, los resultados experimentales se adecuaron al modelo de la ley de potencia de Ostwald.

- ✓ Quintana, S; Granados, C. & García, L. (2016) en "Propiedades reológicas de la pulpa de papaya (*Carica papaya*)" analizaron el comportamiento reológico de pulpas de papaya entre 5°C a 80°C encontrando el comportamiento de un fluido no newtoniano pseudoplástico, y los datos se ajustaron al modelo de Carreau-Yasuda.
- ✓ Silva, M.; Agudelo, C.; Camacho, M.; Martínez-Navarrete, N. (2015) en la tesis de master "Estudio del comportamiento reológico de zumo de fruta obtenido a partir de pomelo liofilizado" trabajaron con muestras de puré de pomelo a los cuales se agregó goma arábica y fibra de bambú; estudiaron el comportamiento reológico entre 10°C a 30°C, encontrando un comportamiento pseudoplástico y que los datos experimentales se ajustaron a la ley de potencia.

4.2 El níspero de palo

La planta del níspero de palo es un árbol de la familia de las rosáceas, originario del Asia menor y del sudeste de Europa. En el Perú, se siembra en los valles de la zona andina del Perú, principalmente en los departamentos de Ayacucho y Junín (Palomino, 2000).

4.2.1 Características botánicas

El níspero de palo es un árbol frutal de porte mediano (cinco a seis metros de altura) y con una copa de forma piramidal o esférica (Ver Figura N°4.1), que requiere de climas templados

y temperaturas que oscilan entre 18 a 20 °C. Esta planta logra mejor desarrollo en suelos ácidos y secos, y prefiere las exposiciones al sol (Vargas, 2009).

Figura N° 4.1: ÁRBOL DEL NÍSPERO

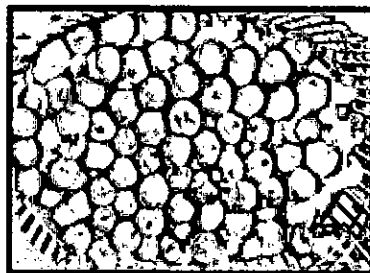


Fuente: Elaboración propia

El fruto del nispero de palo es una drupa, que se caracteriza por contener una semilla cubierta por una capa leñosa y rodeada de una carne comestible, del mismo modo que en el caso de aceitunas, albaricoques, cerezas, etc. (Primo, 1978).

El fruto del nispero de palo (Ver Figura N°4.2) es de forma ovoide o piriforme, de tamaño de 1.5 – 3.5 cm, y de cáscara delgada.

Figura N° 4.2: FRUTO DEL NÍSPERO



Fuente: Elaboración propia

En estado de madurez, la cáscara es de color variable del amarillo – naranja al anaranjado oscuro y la pulpa, de sabor agridulce, es de color amarillento – naranja. Generalmente los



frutos se producen agrupados en número de cuatro a cinco, rara vez están aislados (Palomino, 2000).

4.2.2 Clasificación taxonómica

El níspero de palo pertenece a la especie *Mespilus germánica* L., de la familia de las rosáceas.

La clasificación taxonómica según el Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, utilizando el sistema de clasificación de Cronquist, es mostrada en la tabla N°4.1 (Vargas, 2009).

Tabla N°4.1: CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL NÍSPERO DE PALO

División	MAGNOLIOFHYTA
Clase	MAGNOLIOPSIDA
Orden	ROSALES
Familia	ROSACEAE
Género	<i>Mespilus</i>
Especie	<i>Mespilus germánica</i> L.

Fuente: Vargas, 2009

4.2.3 Composición química del níspero

La composición química proximal de la parte comestible del fruto del níspero de palo hace referencia a los componentes mayores o nutrientes tales como el contenido de humedad, de proteínas, grasas, carbohidratos y cenizas, este último referido



a las sales minerales. En la literatura, la mayor parte de la información sobre la composición química está referida a otra variedad de níspero, la variedad *Eriobotrya japónica* que es conocido como el níspero japonés.

La información sobre la composición química proximal del níspero de palo es muy pobre y los datos encontrados se presentan en la tabla N°4.2.

Tabla N°4.2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NÍSPERO DE PALO (POR 100 G DE LA PARTE COMESTIBLE)

Componente	(1)	(2)
Humedad	73.13	72.30
Proteínas	0.57	2.38
Grasas	0.41	0.29
Cenizas	0.63	2.54
Carbohidratos	23.04	19.87

Fuente: (1) Vargas, 2009
(2) Leandro, 2000

Estos valores, aunque no son iguales, nos señalan que el fruto del níspero de palo presenta un alto contenido de carbohidratos y que las proteínas, grasas y cenizas se encuentran presentes en menor proporción.

4.3 Reología

La reología es una rama de la física que estudia las deformaciones que sufre un cuerpo cuando está bajo la influencia de fuerzas



mecánicas, es decir las deformaciones relacionadas con el flujo de la materia. (Roudot, 2004).

Se le conoce como la ciencia del flujo y de la deformación, y se aplica para el estudio de las propiedades mecánicas de gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas, materiales cristalinos y otros. Su campo de estudio abarca desde la mecánica de fluidos newtonianos aplicada para fluidos líquidos hasta la elasticidad de Hooke aplicada para la reología de sustancias sólidas (Ramírez, 2006).

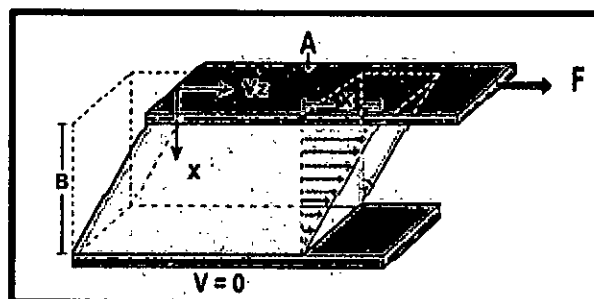
En el caso específico de los fluidos líquidos, se consideran sustancias que se deforman de modo continuo al aplicarles un esfuerzo cortante (Fuerza cizallante/área = F/A).

El comportamiento reológico de un fluido se definirá en base a la respuesta que presenta al ser expuesto a una fuerza externa, que puede ser el flujo o una deformación.

4.3.1 Viscosidad

La viscosidad se define como una resistencia a la deformación de un fluido. Esta es una propiedad física de los materiales que consiste en la medida de la deformación de un fluido cuando se le aplica una fuerza cizallante, esta deformación se denomina flujo. (Ramírez, 2006).

Figura N°4.3: MOVIMIENTO DE UN FLUIDO



Fuente: Carrasco, 2011

Cuando se aplica una fuerza cizallante F sobre un área A de la superficie de un fluido en contacto con un plano estacionario, entonces la capa superior del fluido se desplazará con una velocidad y mientras la capa en contacto con el plano quedará estacionaria (Ver Figura N°4.3).

La capa superior a su vez arrastra a la capa subyacente, con una velocidad ligeramente reducida, y ésta a su vez arrastra a la capa siguiente. En consecuencia, se establece un gradiente de velocidad dentro del fluido (Carrasco, 2011).

Si un fluido se somete a una fuerza cortante τ (esfuerzo cortante o fuerza de cizalla), se produce un gradiente de velocidad D (gradiente de deformación) proporcional a la fuerza de modo que:

$$\tau = \frac{F}{A} = \alpha \cdot \left(- \frac{du}{dx} \right) \quad (1)$$

donde α es una constante de proporcionalidad y

$$D = \left(- \frac{du}{dx} \right) \quad (2)$$

La viscosidad es la propiedad característica que representa la resistencia a fluir y se define como la razón entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. (Carrasco, 2011).

Cuando un líquido cumple con la Ley de Newton, la constante de proporcionalidad es igual a μ , la viscosidad absoluta. Para el tipo de fluidos conocido como fluidos newtonianos existe una proporcionalidad (relación lineal) entre la fuerza de cizalla y el gradiente de cizalla, que es la viscosidad μ . (Darby, 2001).



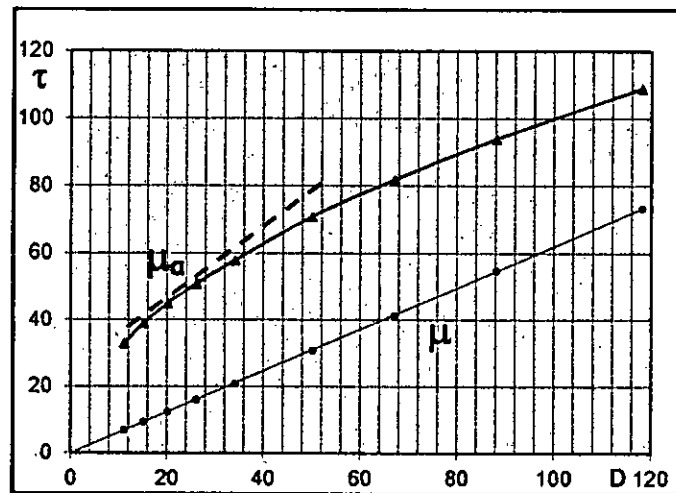
$$\tau = \mu \cdot \left(-\frac{du}{dx}\right) \quad (3)$$

Cuando el fluido no es ideal, es decir un fluido no newtoniano, la proporcionalidad es puntual, no es constante, y se le denomina viscosidad aparente μ_a .

$$\tau = \mu_a \cdot \left(-\frac{du}{dx}\right) \quad (4)$$

En la figura N°4.4 se presenta una curva de fluidez o reograma, donde se representa la proporcionalidad para un fluido newtoniano (μ) y para un fluido no newtoniano (μ_a).

Figura N°4.4: CURVA DE FLUIDEZ



Fuente: Elaboración propia

Para el caso de un fluido newtoniano se puede observar que la proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación es constante, y en este caso la proporcionalidad es la viscosidad absoluta (μ). En cambio para un fluido no newtoniano, la proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la



velocidad de deformación es puntual, es decir que varía según el punto de evaluación y se denomina viscosidad aparente (μ_a).

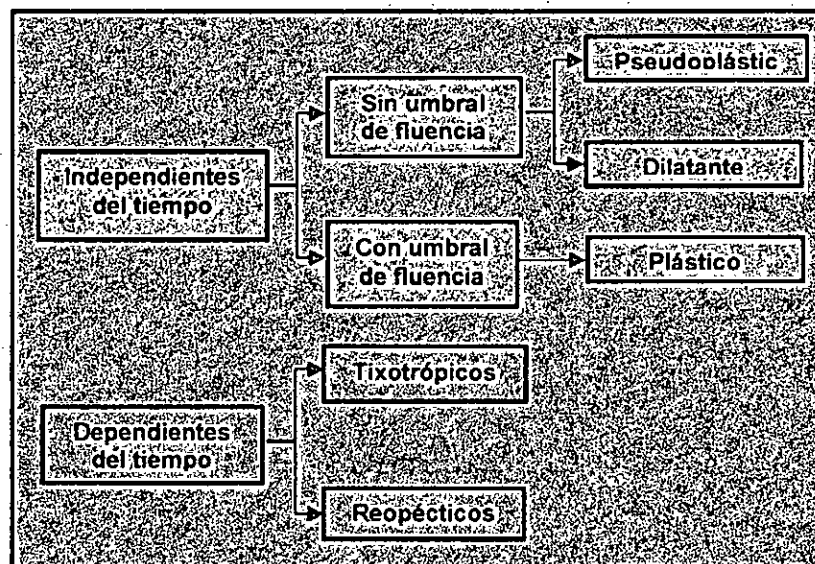
4.3.2 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no permanece constante; por lo tanto no cumplen la ley de Newton, en condiciones de temperatura y composición invariables.

Estos fluidos tienen un comportamiento distinto causado por su compleja estructura microscópica, son líquidos de naturaleza polimérica, dispersiones de partículas sólidas en un líquido o emulsiones de dos líquidos inmiscibles (Gamarra, 2013).

En la Figura N°4.5 se presenta la clasificación de los fluidos no newtonianos.

Figura N°4.5: CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS NO NEWTONIANOS



Fuente: Elaboración propia



Los fluidos no newtonianos se clasifican en dos categorías:

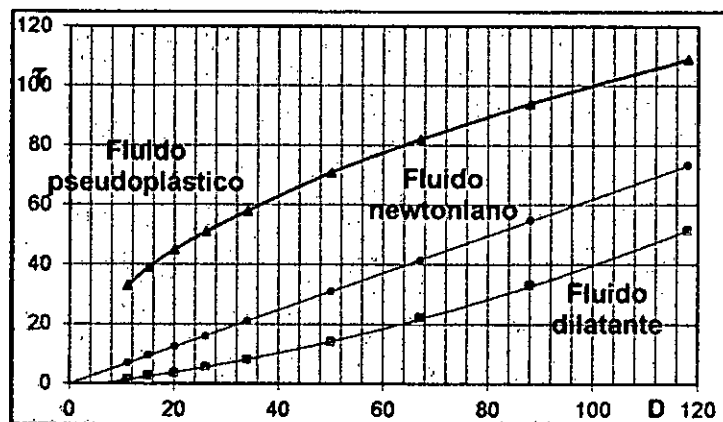
- ✓ Fluidos independientes del tiempo
- ✓ Fluidos dependientes del tiempo

Los fluidos no newtonianos independientes del tiempo se clasifican en dos grupos, según presenten o no un umbral de fluencia. El umbral de fluencia hace referencia al requerimiento de un valor mínimo de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

Aquellos fluidos que no presentan umbral de fluencia pueden ser fluidos pseudoplásticos o fluidos dilatantes, y aquellos que presentan umbral de fluencia son denominados fluidos plásticos.

En la figura N°4.6 se representa un reograma para los fluidos no newtonianos sin umbral de fluencia comparados con un fluido newtoniano.

Figura N°4.6: REOGRAMA DE FLUIDOS SIN UMBRAL DE FLUENCIA



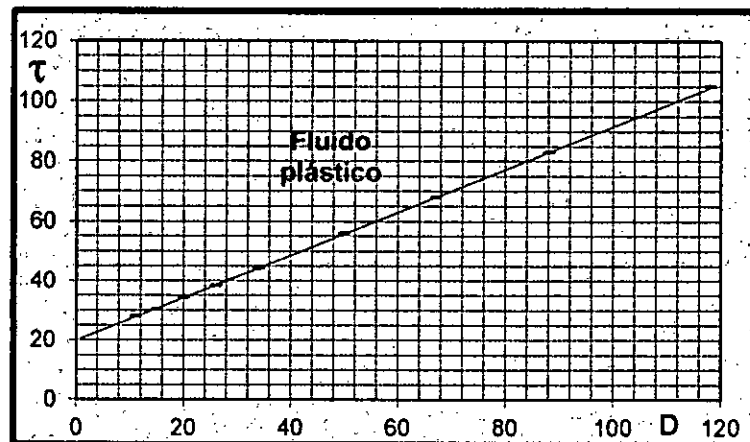
Fuente: Elaboración propia

Los fluidos pseudoplásticos se caracterizan porque su viscosidad aparente decrece al incrementarse la velocidad de deformación, por el contrario en el caso de los fluidos dilatantes la viscosidad aparente aumenta al incrementarse la velocidad de deformación.

Los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo cortante límite o umbral de fluencia, una vez alcanzado este valor, la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo cortante aplicado, al igual que en los fluidos newtonianos. (Carrasco, 2011).

En la figura N°4.7 se presenta un reograma para un fluido plástico.

Figura N°4.7: REOGRAMA DE FLUIDOS CON UMBRAL DE FLUENCIA



Fuente: Elaboración propia

Los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo se clasifican a su vez en fluidos tixotrópicos y fluidos reopécticos. Los fluidos tixotrópicos se caracterizan porque la viscosidad disminuye con el tiempo, al aplicarse un esfuerzo este comienza a fluir pero al ser dejado en reposo este toma su



viscosidad inicial y deja de fluir, por lo tanto el efecto es reversible.

En cambio, en los fluidos reopécticos la viscosidad se incrementa con el tiempo, la aplicación de un pequeño esfuerzo promueve la formación de una estructura (Carrasco, 2011).

4.3.3 Modelos reológicos

Las mediciones reológicas permiten obtener modelos reológicos que se aplican en la ingeniería de procesos, principalmente en las operaciones unitarias que implican transferencia de momento y de calor (Ibarz, 2011).

Un modelo reológico es una expresión matemática que relaciona la velocidad de deformación (**D**) como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo cortante (τ), y que por lo general son ecuaciones empíricas.

Uno de los primeros modelos desarrollados para su aplicación en la reología, es el modelo de Ostwald – De Waele, conocido como la ley de potencia, y que toma en consideración que la relación τ vs **D** no es constante como en el caso de los fluidos newtonianos.

Este modelo se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = k \cdot \left(\frac{du}{dx}\right)^n \quad (5)$$

donde k es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento del flujo. Cuando $n = 1$, relación τ vs **D** es proporcional y entonces se trataría de un fluido newtoniano. (Rao, 2014).



Una relación más general para describir el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos es el modelo de Herschel – Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \left(\frac{du}{dx} \right)^n \quad (6)$$

donde k es el índice de consistencia, n es el índice de comportamiento del flujo y τ_0 es la tensión de fluencia. Este modelo es adecuado para muchos alimentos fluidos.

El modelo es muy conveniente porque se puede aplicar para fluidos newtonianos, fluidos independientes del tiempo sin umbral de fluencia (pseudoplásticos o dilatantes) y con umbral de fluencia (plásticos de Bingham) considerándolos como casos particulares del modelo de Herschel – Bulkley (Steffe, 1996).

Los probables valores de estas constantes, de acuerdo al comportamiento reológico del fluido se presentan en la tabla N°4.3.

Tabla N°4.3: HERSCHEL – BULKLEY: VALORES DE CONSTANTES

Fluido	K	n	τ_0
Newtoniano	>0	1	0
Pseudoplástico	>0	$0 < n < 1$	0
Dilatante	>0	$1 < n < \infty$	0
Plástico Bingham	>0	1	>0

Fuente: Steffe, 1996



Como puede observarse en estos dos modelos reológicos se consideran dos parámetros: el coeficiente de consistencia (**k**) y el índice de comportamiento (**n**).

El índice de consistencia es una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación que se utiliza como un indicador del grado de viscosidad de los fluidos no newtonianos y el índice de comportamiento es un número adimensional que indica la cercanía al comportamiento de un fluido newtoniano, el cual tiene un valor de $n = 1$ (Ramírez, 2006).

Para los fluidos que tienen un comportamiento reológico independiente del tiempo se han desarrollado muchos otros modelos, entre los cuales podemos destacar el modelo de Casson, el modelo de Bingham y el modelo de Robertson-Stiff (Steffe, 1996).

Tabla N°4.4: MODELOS REOLÓGICOS – FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO

Modelo	Función
Ostwald-De Waele	$\tau = k \cdot \left(\frac{du}{dx}\right)^n$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_o + \mu \left(\frac{du}{dx}\right)^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_o^{1/2} + k \cdot \left(\frac{du}{dx}\right)^{1/2}$
Bingham	$\tau = \tau_o + k \cdot \frac{du}{dx}$
Robertson-Stiff	$\tau = k \cdot \left[\left(\frac{du}{dx}\right)_0 + \left(\frac{du}{dx}\right)\right]^n$

Fuente: Steffe, 1996



En la tabla N°4.4 se muestran los modelos reológicos mencionados anteriormente y que han sido utilizados para el modelado de los datos experimentales, aunque cabe señalar que existen otros modelos empíricos más complejos.

4.3.4 Importancia de la reología

Existen razones fundamentales para justificar el estudio del comportamiento reológico de los cuerpos

- ✓ Contribuye al conocimiento de su estructura; por ejemplo, existe cierta relación entre el tamaño y forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como entre el grado de entrecruzamiento de los polímeros y su elasticidad (Steffe, 1996).
- ✓ En la industria se efectúan con frecuencia medidas reológicas sobre las materiales primas y los productos en elaboración, que son de gran utilidad para el control de los procesos (Steffe, 1996).
- ✓ Presta una valiosa ayuda al diseño de las máquinas; es preciso que tolvas, tuberías y bombas se adecuen a las características de los productos con los que van a ser utilizadas (Steffe, 1996).

4.5 Definición de términos básicos

Pulpa:

Corresponde al tejido vegetal celular que contienen un fruto y que rodean o contienen a las semillas. Esta juega un papel preponderante en la alimentación pues contienen la fibra que es esencial para la salud del ser humano.



Dispersión:

Es un sistema formado por dos fases, una fase continua que es fluida (líquido o gas) y la otra fase constituida por partículas que están dispersas en el fluido. Las partículas que forman parte de la dispersión pueden ser diferentes tamaños, pero generalmente son tamaños microscópicos. Las dispersiones pueden ser groseras, finas o coloidales.

Reometría:

Ciencia que describe los métodos de medición de las propiedades reológicas así como los equipos utilizados para su medición, proporcionando una relación cuantitativa y cualitativa entre la deformación de un material al aplicar un esfuerzo cortante.

Comportamiento reológico:

El comportamiento reológico de un fluido es la respuesta que presenta al exponerlo a una acción mecánica, y que puede ser influenciado por la temperatura y el tiempo. De acuerdo a este comportamiento, los fluidos se pueden clasificar en fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos. En los primeros, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación de este, mientras que en los segundos no existe esa proporcionalidad.



V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales y equipos

5.1.1 Materia prima

- ✓ Níspero de palo

5.1.2 Insumos

- ✓ Azúcar
- ✓ Agua

5.1.3 Materiales

- ✓ Embudo de filtración
- ✓ Gradilla para tubos de ensayo
- ✓ Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- ✓ Papel filtro
- ✓ Pipetas graduadas de 1, 5 y 10 ml
- ✓ Pinzas metálicas
- ✓ Probetas de 100 y 250 ml
- ✓ Tubos de ensayo de 10 ml
- ✓ Varillas de vidrio
- ✓ Vasos de precipitado de 500 ml

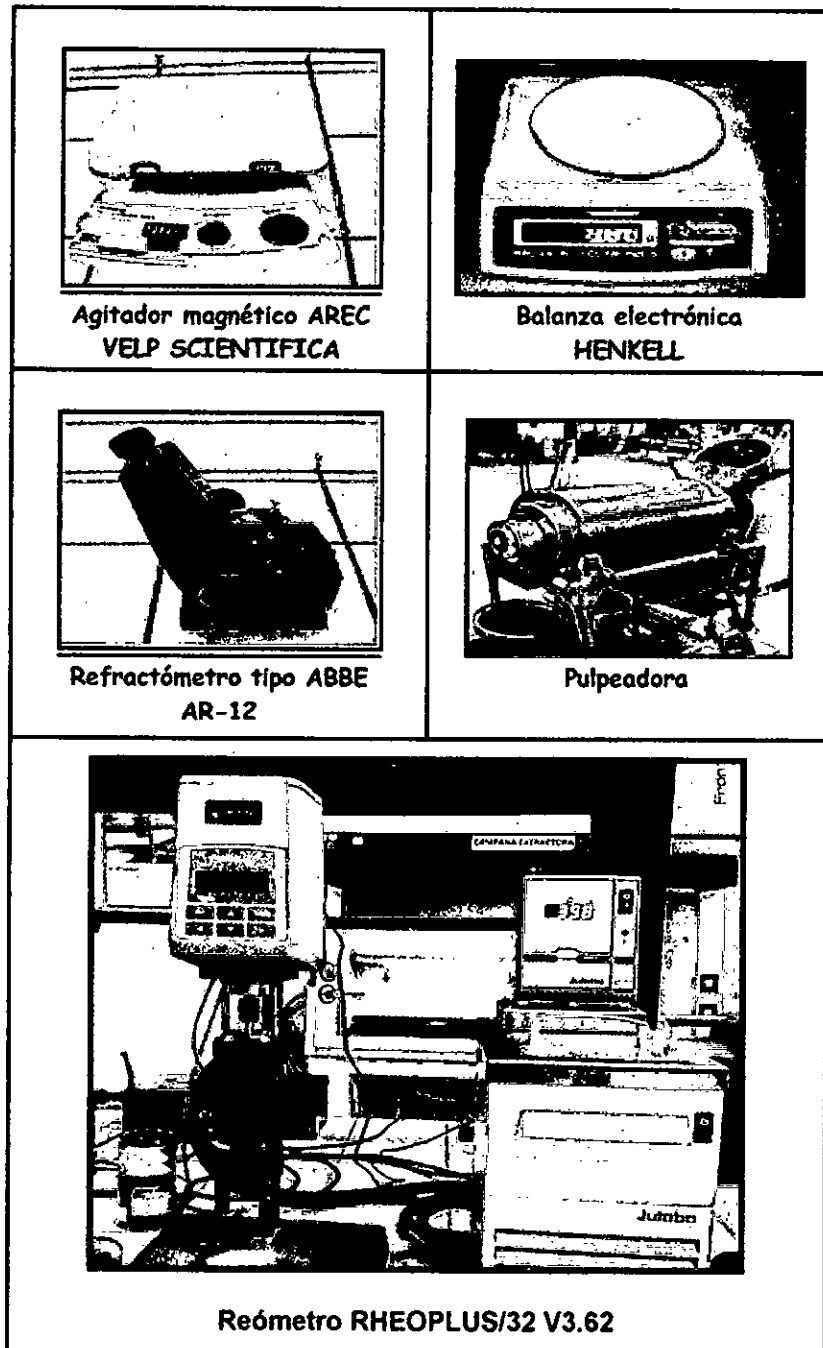
5.1.4 Equipos

- ✓ Agitador magnético con calentamiento VELP SCIENTIFICA
- ✓ Balanza electrónica HENKEL 0.01 g
- ✓ Estufa aire caliente VENTICELLI
- ✓ Refractómetro tipo ABBE AR-12 SCHMIDT & HAENSEL
- ✓ Pulpeadora
- ✓ Reómetro RHEOPLUS/32 V3.62
- ✓ Termómetro



En la figura N° 5.1 se presentan los equipos utilizados en las pruebas experimentales.

Figura N°5.1: EQUIPOS UTILIZADOS EN PRUEBAS EXPERIMENTALES



Fuente: Elaboración propia



5.2 Población y muestra

La investigación es experimental y se toma como universo al níspero de palo que se produce en las zonas andinas del Perú.

La población está representada por frutos del níspero de palo procedente de la provincia de Huanta – Ayacucho, adquiridos en el Mercado de Frutas de Lima.

Dado que el presente trabajo de investigación es experimental no es aplicable la determinación del tamaño de muestra mediante los métodos estadísticos conocidos. La cantidad de muestra utilizada estuvo limitada por la capacidad de los equipos utilizados en las pruebas experimentales y que en el caso del presente trabajo ha sido de 200 g de pulpa para cada prueba experimental.

5.3 Técnicas e instrumentos de recolección datos

Para la recolección de datos se consideraron tres etapas: el acondicionamiento de la materia prima, la formulación de las dispersiones y las pruebas experimentales de reología.

5.3.1 Acondicionamiento de la materia prima

El acondicionamiento de la materia prima se realizó con la finalidad de obtener la pulpa del fruto, que sirvió de base para la preparación de las dispersiones de pulpa en agua.

Las operaciones utilizadas para el acondicionamiento de la materia prima fueron:

- ✓ Selección,
- ✓ Limpieza,
- ✓ Cocción,
- ✓ Pulpeado,

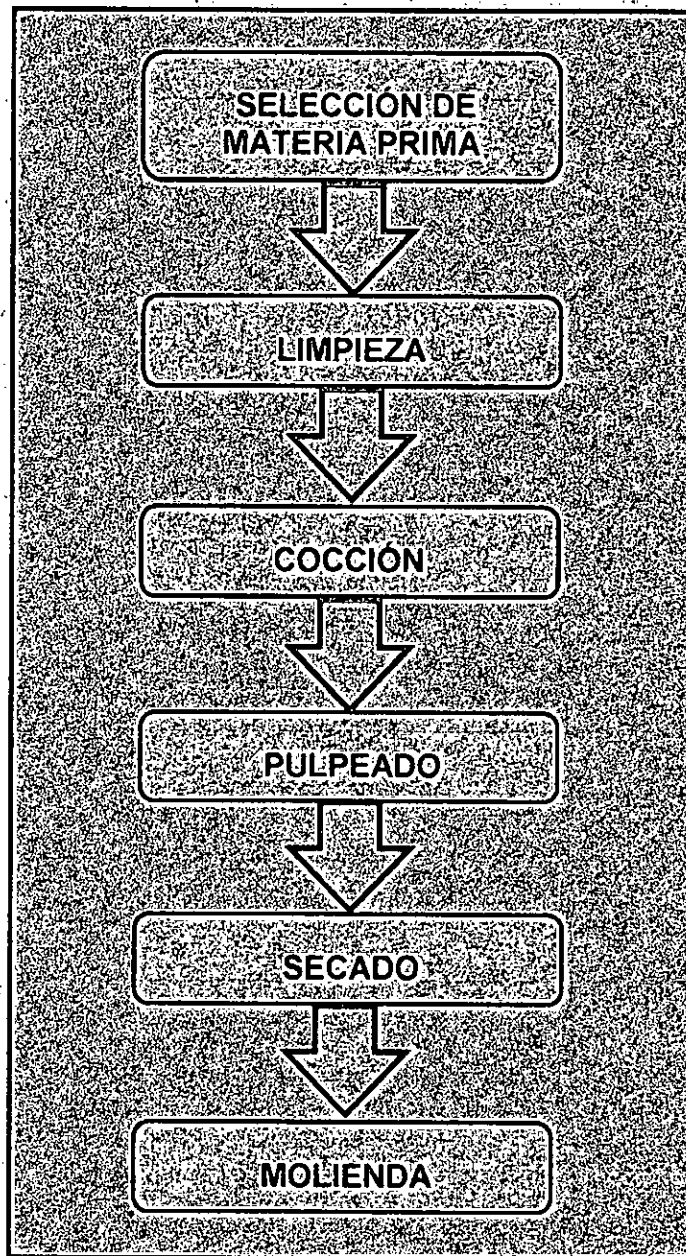


✓ Secado y

✓ Molienda

En la figura N°5.2 se presenta el diagrama de flujo que muestra la secuencia de las operaciones utilizadas para obtener la pulpa del níspero de palo deshidratada.

Figura N° 5.2: DIAGRAMA DE FLUJO

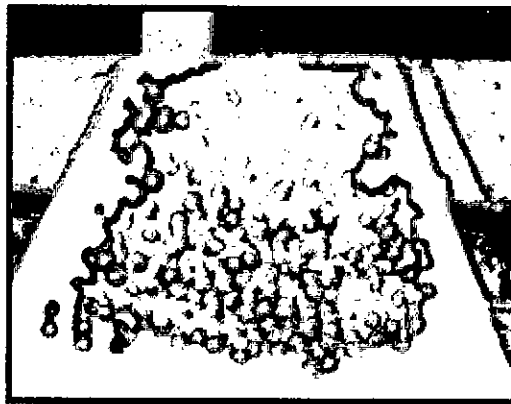


Fuente: Elaboración propia

Selección

Se realizó la selección del nispero de palo tomando en cuenta el estado de madurez, escogiendo aquellos de color amarillo – naranja y separando aquellos que presentaban manchas o defectos causados por mohos, ya que estos factores influyen en la calidad del producto. (Ver Figura N°5.3)

Figura N° 5.3: NÍSPERO DE PALO SELECCIONADO



Fuente: Elaboración propia

Limpieza o lavado

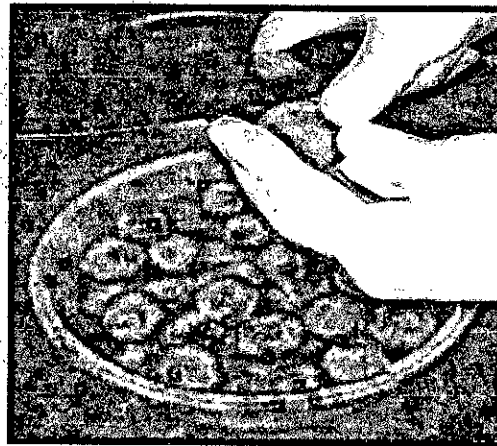
La limpieza se realizó por inmersión en agua clorada, con una concentración de 3 - 5 ppm de hipoclorito de sodio), con la finalidad de separar toda partícula extraña a la materia prima y una desinfección, eliminando los restos de suciedad que podría favorecer el crecimiento de microorganismos y deteriorar el producto. Luego se enjuagó con agua limpia, para eliminar las últimas trazas de suciedad y los restos de agua clorada.

Cocción

La cocción se realizó con agua a 100 °C por un tiempo de 20 minutos, con la finalidad de lograr un ablandamiento de la pulpa

del níspero de palo y facilitar la separación de las semillas y cáscara del fruto.(Ver figura N°5.4).

Figura N° 5.4: NÍSPERO DE PALO COCIDO



Fuente: Elaboración propia

Pulpeado

Los frutos cocidos se llevaron a una pulpeadora que disponía de un tamiz interno con una abertura de 3 mm, lo que permitió obtener la pulpa libre de semillas y cáscara.

Secado

Se tomaron muestras de pulpa y se secaron mediante una estufa con aire caliente, a una temperatura de 104 °C y por un tiempo de 24 horas aproximadamente hasta obtener un peso constante.

Molienda

Las muestras secas se llevaron a un molinillo de martillos con la finalidad de obtener la muestra en forma de partículas pequeñas, a fin de facilitar la preparación de las dispersiones de pulpa de níspero de palo en agua.



5.3.2 Formulación de las dispersiones

Para la formulación de las dispersiones se consideró la concentración de sólidos en agua, preparándose mezclas de agua y pulpa deshidratada del níspero de palo.

Se necesitó el empleo de un equipo de agitación magnética con calentamiento, hasta alcanzar una mezcla uniforme y controlando la concentración final mediante el empleo de un refractómetro.

Se formularon dispersiones pulpa de níspero/agua, según se muestra en la Tabla N°5.1.

Tabla N°5.1: FORMULACIÓN DE DISPERSIONES

Masa pulpa, g	Masa agua, g	°Brix
5	95	5
10	90	10
15	85	15

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Pruebas experimentales reológicas

Las pruebas experimentales reológicas se realizaron con las dispersiones preparadas según las concentraciones expresadas en °Brix, de acuerdo a las formulaciones presentadas en la tabla N°5.1.

Las pruebas experimentales se realizaron para cada una de las dispersiones formuladas utilizando tres niveles de temperatura:



20, 30 y 40 °C. Las condiciones en que se realizaron las pruebas se muestran en la tabla N°5.2.

Tabla N°5.2: CONDICIONES DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

N° experiencia	°Brix	T °C
1	5	20
2	5	20
3	5	20
4	10	30
5	10	30
6	10	30
7	15	40
8	15	40
9	15	40

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el reómetro RHEOPLUS/32 V3.62 para realizar las mediciones del esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

5.4 Procesamiento estadístico y análisis de datos

Con los datos obtenidos experimentalmente se utilizó el análisis de regresión para poder construir los reogramas correlacionando las variables esfuerzo cortante τ y velocidad de deformación D , utilizando el programa Excell 2010 para la construcción de los reogramas y evaluar el comportamiento reológico de las dispersiones preparadas.

Se aplicó el programa matemático para ecuaciones no lineales Polymath 6.10 Professional Release, el cual nos permitió la evaluación de los parámetros de los modelos reológicos y el cálculo



de criterios estadísticos tales como los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{adj} que frecuentemente se utilizan para juzgar si el modelo representa correctamente los datos experimentales.

Si su valor es cercano a la unidad implica que el modelo es correcto, sin embargo esto debe ser corroborado con el análisis de residuales, debido a que hay muchos ejemplos en el que este coeficiente de correlación es cercano a uno, pero el modelo no es apropiado. (Kucuk et al., 2014).

Para una mejor decisión, estos resultados se corroboraron con el análisis de residuales denominado la raíz del error cuadrático medio (RMSE - Root Mean Squared Error).

Al igual que los coeficientes de determinación, es recomendable estos análisis de los residuales para la comparación de los diversos modelos que representan la misma variable dependiente. Se espera que sus valores sean cercanos a cero, un modelo con menor RMSE representa los datos con mayor precisión que un modelo con valores más grandes de estos indicadores (Kucuk et al., 2014)

VI RESULTADOS

6.1 Caracterización de la materia prima

La caracterización del níspero de palo se realizó en lo que corresponde a la estructura física del fruto, referido a la cáscara, pulpa y semilla.

Se ha determinado que la mayor parte del fruto corresponde a la pulpa o parte carnososa, en segundo lugar corresponde a la semilla y finalmente la cáscara del fruto de acuerdo a lo presentado en la tabla N°6.1.

Tabla N°6.1: ESTRUCTURA FÍSICA DEL NÍSPERO DE PALO

Fruto entero	100 %
Pulpa	71,8 %
Cáscara	7,2 %
Semilla	21,0 %

Fuente: Elaboración propia

6.2 Pruebas experimentales reológicas

Las pruebas experimentales han permitido obtener datos que relacionan el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de deformación (D). Estos resultados son mostrados en las tablas N°6.2 a N°6.4 para dispersiones de 5°Brix, 10 °Brix y 15°Brix y temperaturas de 20°C, 30°C y 40°C.

Tabla N°6.2: DATOS EXPERIMENTALES DISPERSIONES DE 5°BRIX

20 °C		30 °C		40 °C	
D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)
0.62	1.00	0.74	1.00	0.88	1.00
0.98	1.50	1.07	1.50	1.61	1.50
1.57	1.99	1.94	1.99	2.25	1.99
2.33	2.49	2.85	2.49	3.65	2.49
3.11	2.99	4.01	2.99	4.70	2.99
4.53	3.49	4.95	3.49	5.95	3.49
5.75	3.98	6.86	3.98	7.08	3.98
7.15	4.48	8.31	4.48	8.92	4.48
8.62	4.98	10.80	4.98	11.50	4.98
10.90	5.48	12.60	5.48	14.30	5.48
12.50	5.97	15.60	5.97	17.40	5.97
15.30	6.47	18.90	6.47	20.70	6.47
17.20	6.97	22.40	6.97	25.10	6.97
20.80	7.47	26.20	7.47	30.00	7.47
24.80	7.96	30.40	7.96	34.70	7.96
28.90	8.46	35.40	8.46	40.10	8.46
35.10	8.96	40.70	8.96	46.10	8.96
42.10	9.46	46.70	9.46	52.80	9.46
50.20	9.95	53.00	9.95	60.10	9.95
57.80	10.50	59.80	10.50	70.50	10.5
62.60	10.90	67.60	10.90	76.70	10.9
71.00	11.40	76.00	11.40	86.00	11.4
76.85	11.90	85.00	11.90	96.10	11.9

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°6.3: DATOS EXPERIMENTALES DISPERSIONES DE 10°BRIX

20 °C		30 °C		40 °C	
D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)
0.74	1.00	0.84	1.00	0.99	1.00
1.08	1.50	1.17	1.50	1.36	1.50
1.37	1.99	1.84	1.99	2.04	1.99
1.83	2.49	2.85	2.49	3.15	2.49
2.61	2.99	4.21	2.99	4.91	2.99
4.08	3.49	5.25	3.49	5.95	3.49
5.35	3.98	6.76	3.98	6.96	3.98
6.75	4.48	8.31	4.48	8.42	4.48
8.72	4.98	10.80	4.98	11.50	4.98
10.20	5.48	12.60	5.48	14.30	5.48
12.50	5.97	15.60	5.97	17.40	5.97
15.30	6.47	18.90	6.47	20.70	6.47
18.20	6.97	22.40	6.97	25.10	6.97
21.00	7.47	27.20	7.47	30.00	7.47
24.80	7.96	31.40	7.96	35.70	7.96
28.90	8.46	36.40	8.46	41.10	8.46
36.10	8.96	40.70	8.96	46.10	8.96
42.10	9.46	46.70	9.46	52.80	9.46
52.20	9.95	53.00	9.95	60.10	9.95
59.80	10.50	59.80	10.50	69.30	10.50
67.60	10.90	67.60	10.90	76.70	10.90
76.00	11.40	76.00	11.40	86.00	11.40
85.00	11.90	85.00	11.90	96.10	11.90

Fuente: Elaboración propia



Tabla N°6.4: DATOS EXPERIMENTALES DISPERSIONES DE 15°BRIX

20 °C		30 °C		40 °C	
D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)	D (1/s)	τ (Pa)
0.16	1.00	0.28	1.00	0.42	1.00
0.20	1.50	0.39	1.50	0.49	1.50
0.39	1.99	0.54	1.99	0.68	1.99
0.57	2.49	0.82	2.49	0.93	2.49
0.84	2.99	0.96	2.99	1.15	2.99
1.24	3.49	1.24	3.49	1.44	3.49
1.51	3.98	1.74	3.98	1.99	3.98
1.93	4.48	1.98	4.48	2.42	4.48
2.25	4.98	2.45	4.98	3.02	4.98
2.64	5.48	2.87	5.48	3.63	5.48
2.93	5.97	3.54	5.97	4.16	5.97
3.51	6.47	4.27	6.47	5.39	6.47
3.97	6.97	4.89	6.97	6.43	6.97
4.52	7.47	6.06	7.47	7.63	7.47
4.99	7.96	7.05	7.96	8.96	7.96
6.01	8.46	8.08	8.46	10.50	8.46
6.59	8.96	9.45	8.96	11.70	8.96
7.90	9.46	10.30	9.46	13.10	9.46
8.75	9.95	11.90	9.95	14.80	9.95
10.05	10.50	13.20	10.50	16.70	10.50
11.10	10.90	14.80	10.90	18.40	10.90
12.70	11.40	16.30	11.40	20.80	11.40
14.00	11.90	18.03	11.90	23.10	11.90
15.20	12.40	19.90	12.40	25.40	12.40
16.60	12.90	21.80	12.90	28.10	12.90
17.50	13.40	23.90	13.40	30.01	13.40

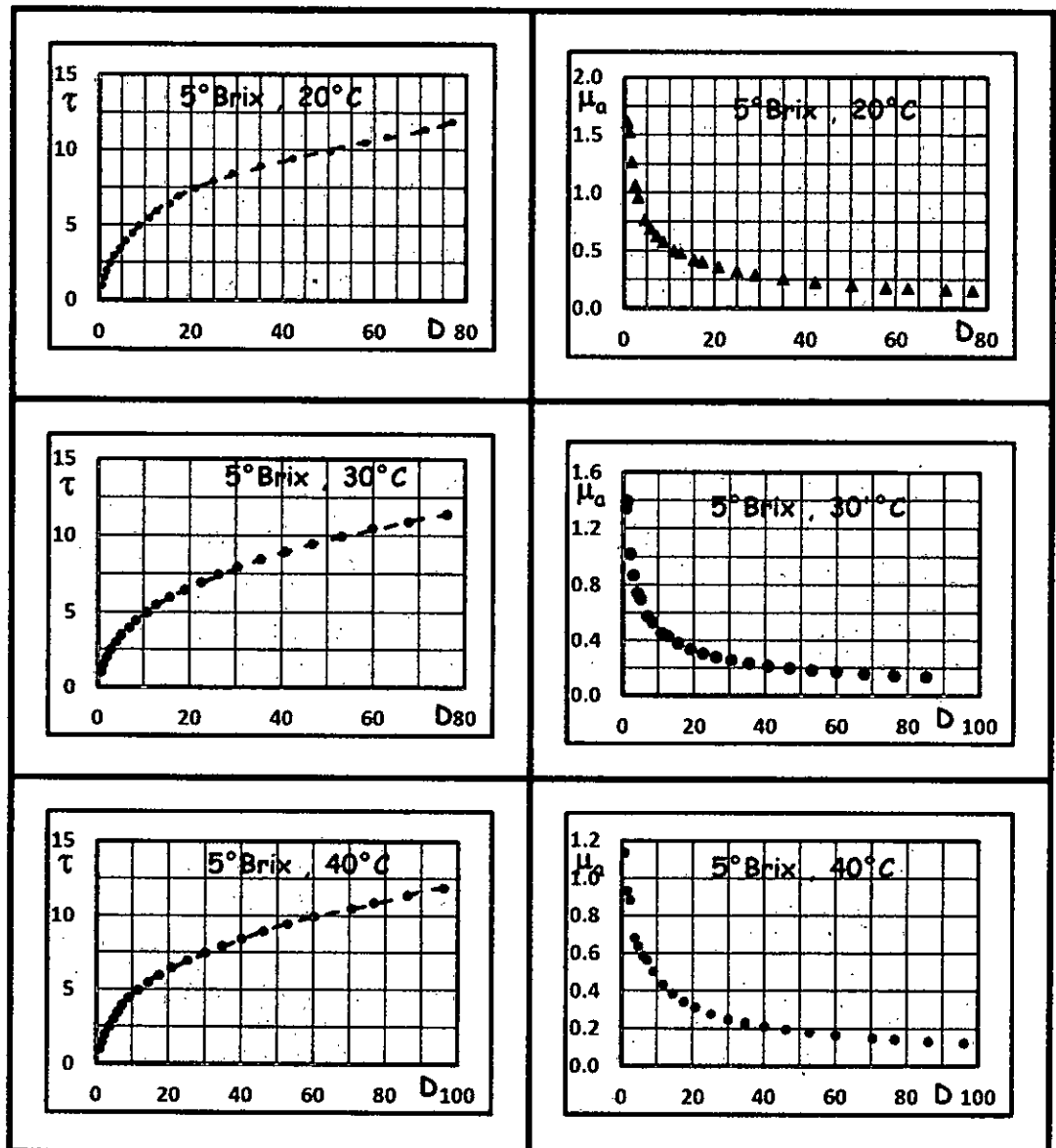
Fuente: Elaboración propia



Con los datos experimentales se puede evaluar la viscosidad aparente (μ_a) en Pa-s, al dividir los valores del esfuerzo cortante (τ expresado en Pascal) entre la velocidad de deformación (D expresada en s^{-1}).

Los resultados obtenidos para la viscosidad aparente se presentan en el Anexo N°1.

Figura N°6.1: REOGRAMAS DE DISPERSIONES DE 5°BRIX

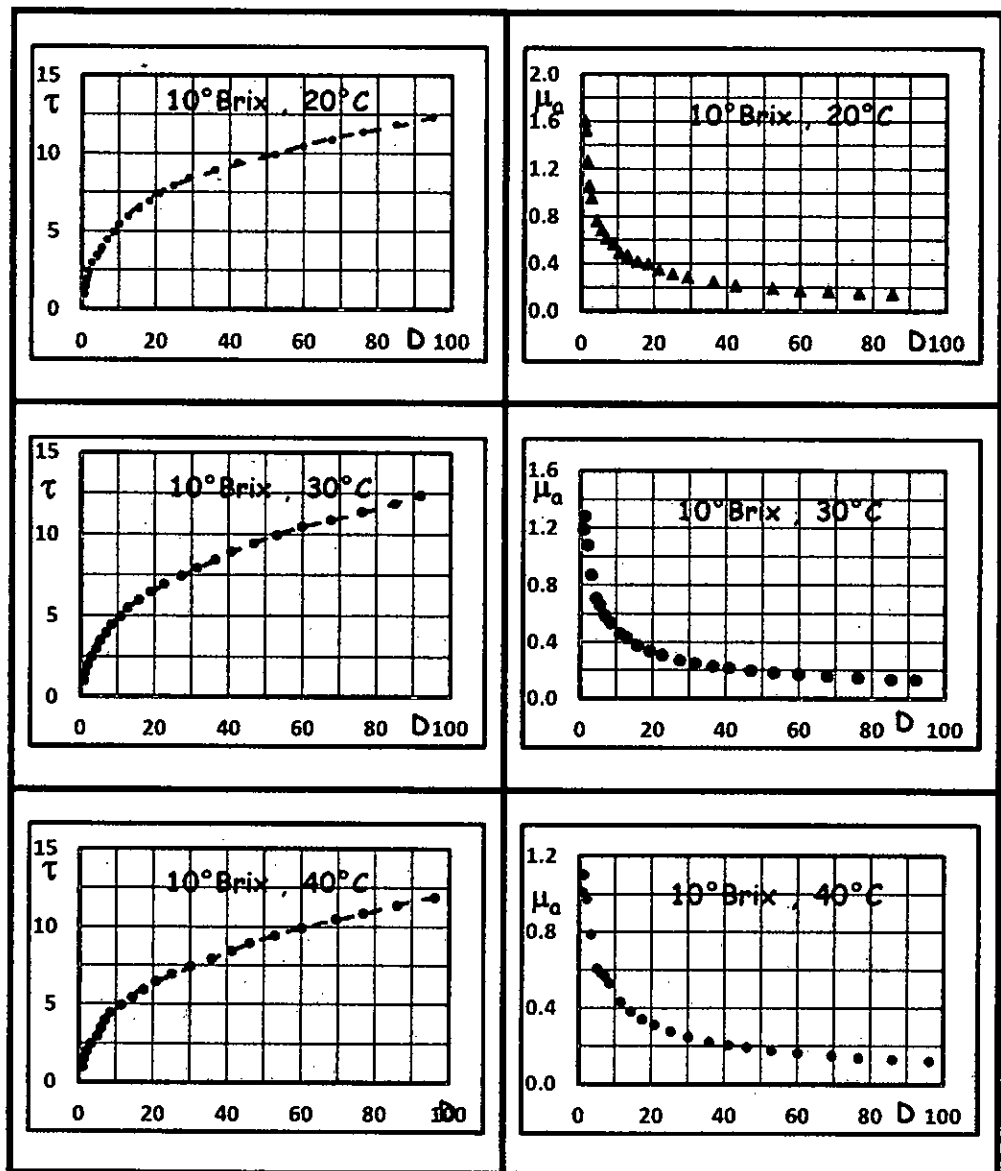


Fuente: Elaboración propia



Estos resultados han permitido construir dos tipos de reogramas, el primero que relaciona el esfuerzo cortante (τ) y con la velocidad de deformación (D) y el segundo que relaciona la viscosidad aparente (μ_a) con la velocidad de deformación (D), los cuales son mostrados en las figuras N°6.1 a N°6.3.

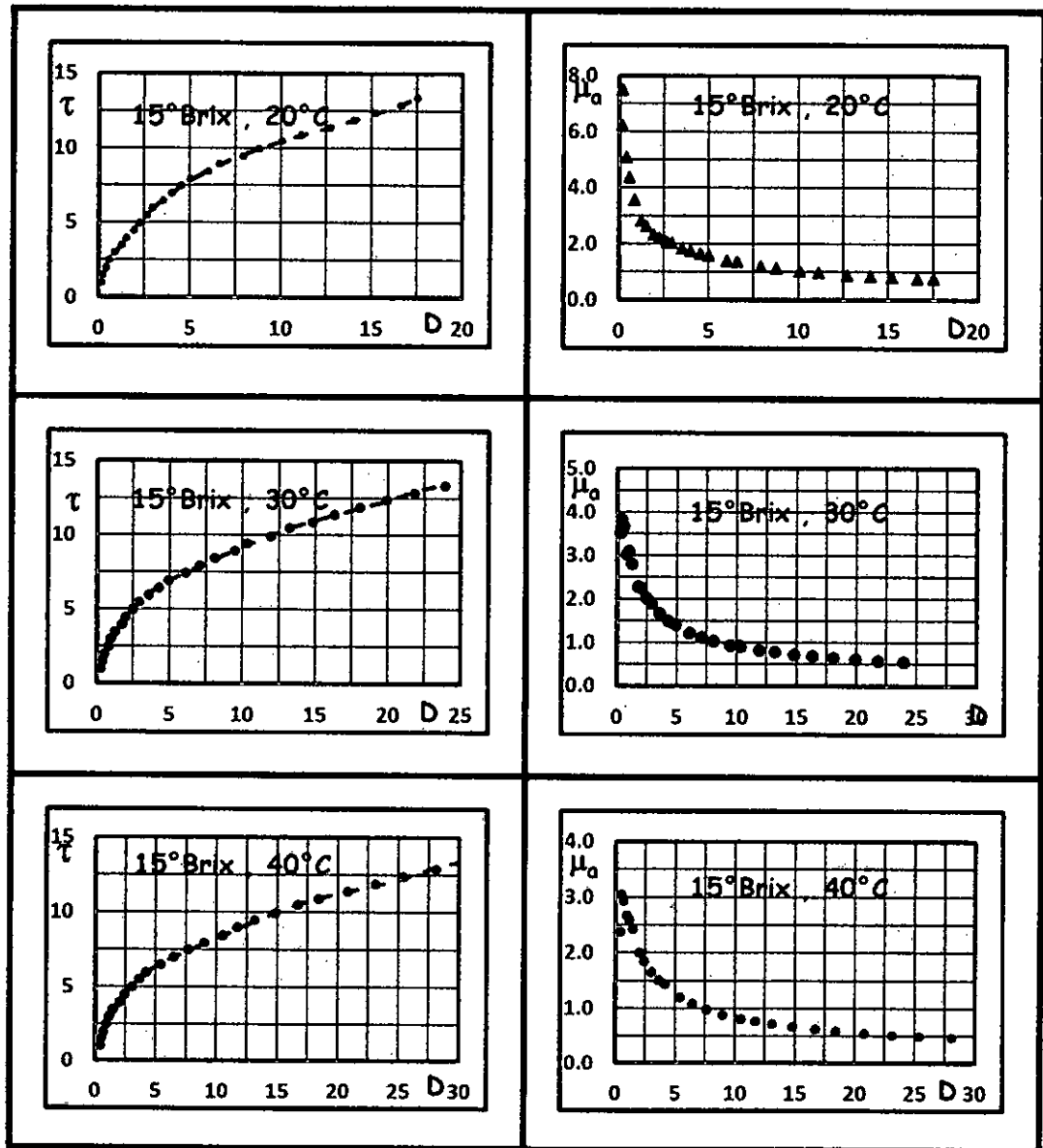
Figura N°6.2: REOGRAMAS DE DISPERSIONES DE 10°BRIX



Fuente: Elaboración propia



Figura N°6.3: REOGRAMAS DE DISPERSIONES DE 15°BRIX

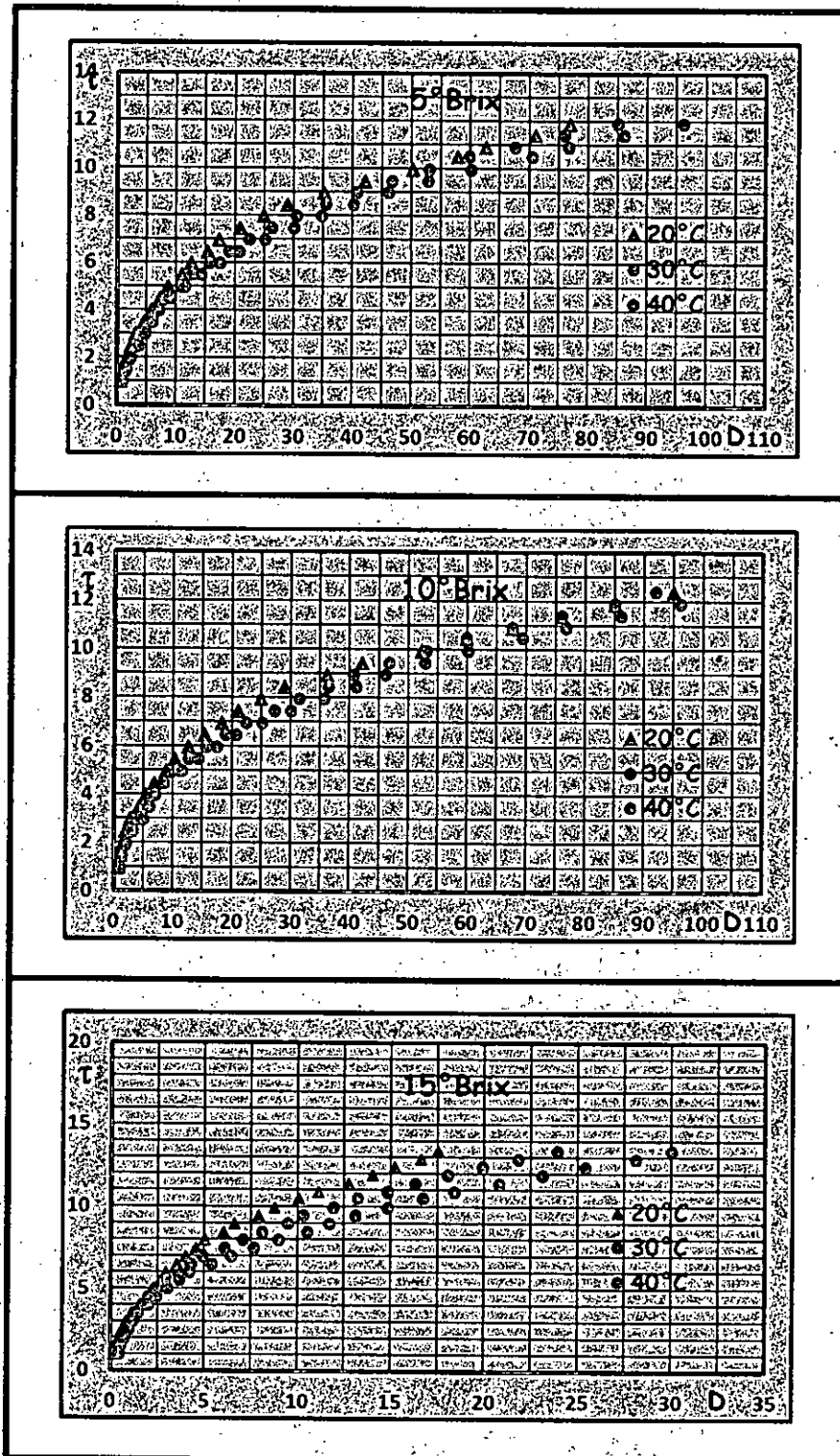


Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la dependencia del comportamiento reológico con la temperatura y la concentración, mediante las figuras N°6.4 a N°6.7 se muestra la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para dichas condiciones.



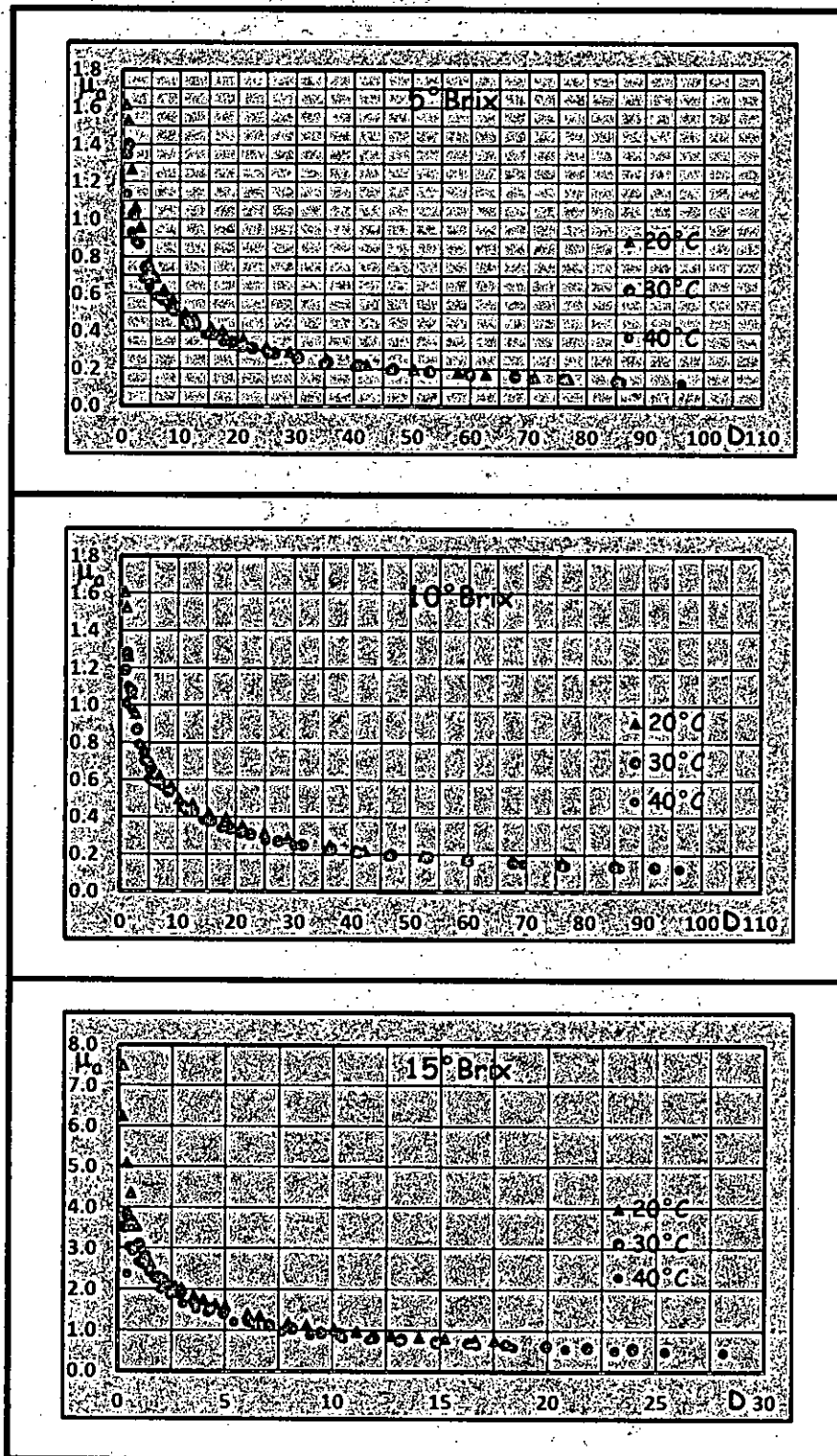
Figura N°6.4: REOGRAMAS τ vs D · CONCENTRACIONES
5 - 15°Brix



Fuente: Elaboración propia

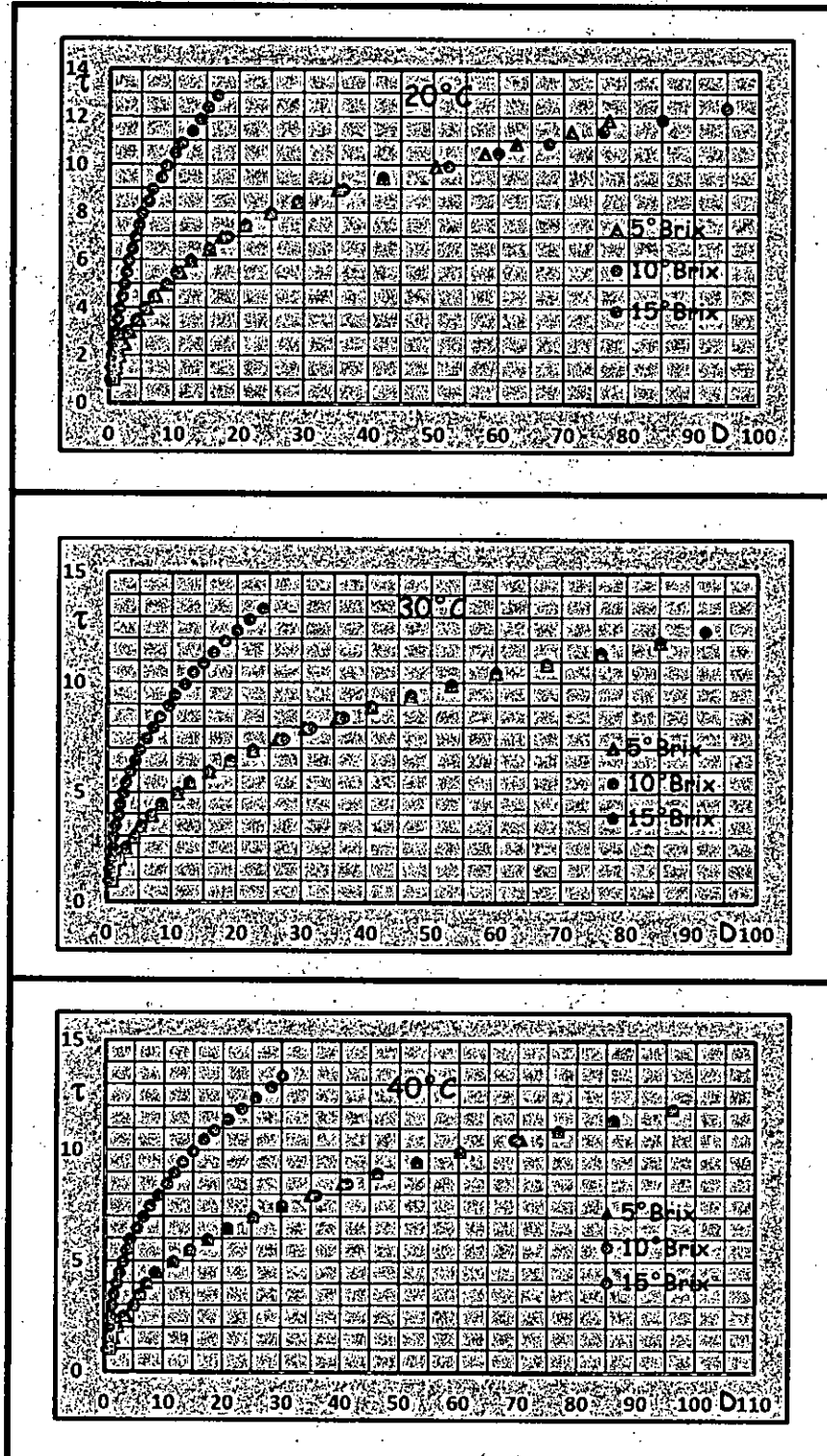
D

Figura N°6.5: REOGRAMAS μ_A vs D - CONCENTRACIONES
5 - 15°BRIX



Fuente: Elaboración propia

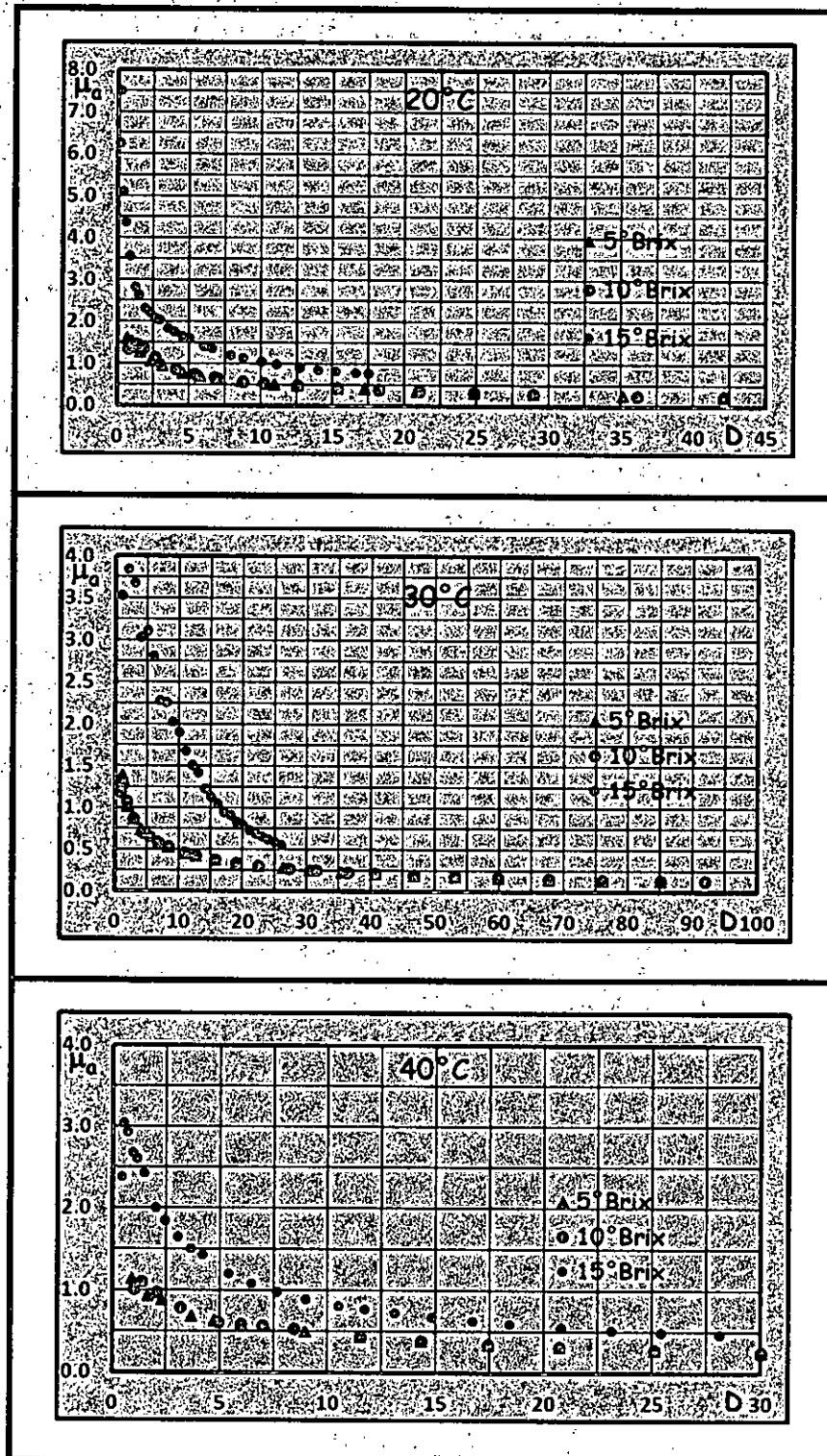
Figura N°6.6 REOGRAMAS τ vs D TEMPERATURAS 20 - 40°C



Fuente: Elaboración propia

P

Figura N°6.7: REOGRAMAS μ_a vs D TEMPERATURAS 20 - 40°C



Fuente: Elaboración propia

D

Para cada una de las pruebas experimentales se aplicaron cinco modelos reológicos tales como el modelo de Ostwald – De Waele, el modelo de Herschel – Bulkley, el modelo de Bingham, el modelo de Casson y el modelo de Robertson – Stiff.

Mediante la aplicación del programa matemático para ecuaciones no lineales Polymath 6.10 Professional Release se han calculado las constantes y exponenciales correspondientes a cada modelo. Así mismo, se han calculado parámetros estadísticos tales como los coeficientes de determinación R^2 , R^2_{adj} y la raíz del error cuadrático medio RMSE, que permitieron establecer cuál fue el modelo que mejor se ajustaba los datos experimentales. Los resultados se presentan en las tablas N°6.5 a N°6.8.

Tabla N°6.5: CONSTANTES DE MODELOS PARA DISPERSIONES DE 5°BRIX

Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Ostwald-De Waele	k =	1.9904940	1.7292540	1.6347100
	n =	0.4157095	0.4400380	0.4401226
	τ_0 =	-2.9746170	-1.7455370	-2.4368420
Herschel-Bulkley	k =	4.3800310	3.0204950	3.4252240
	n =	0.2799157	0.3405529	0.3134536
	τ_0 =	3.2974220	3.0838470	3.1005930
Bingham	k =	0.1300303	0.1231684	0.1079794
	τ_0 =	2.0458290	1.8446660	1.8517480
Casson	k =	0.2447972	0.2432615	0.2277842
	τ_0 =	-0.7549279	-1.1376190	-1.1969590
	k =	2.2855590	2.0474650	1.9460090
Robertson-Stiff	n =	0.3813748	0.3995147	0.3993592

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° N°6.6: CONSTANTES DE MODELOS PARA
DISPERSIONES DE 10°BRIX

Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Ostwald-De Waele	k =	2.1252210	1.7177690	1.6537090
	n =	0.3928147	0.4405907	0.4372288
	τ_0 =	-3.8807970	-1.8032280	-2.1888940
Herschel-Bulkley	k =	5.3292510	3.0291720	3.2653240
	n =	0.2440908	0.3409028	0.3200432
	τ_0 =	3.5774270	3.1747750	3.0981460
Bingham	k =	0.1111924	0.1168205	0.1081272
	τ_0 =	2.3009790	1.8990620	1.8606120
Casson	k =	0.2220411	0.2371507	0.2274256
	τ_0 =	-0.8696277	-0.6628107	-0.8136389
	τ_0 =	2.4970270	1.9171380	1.8841490
Robertson-Stiff	k =	2.4970270	1.9171380	1.8841490
	n =	0.3538622	0.4145362	0.4065076

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° N°6.7: CONSTANTES DE MODELOS PARA
DISPERSIONES DE 15°BRIX

Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Ostwald-De Waele	k =	3.4913120	3.1909500	2.9107630
	n =	0.4727301	0.4578365	0.4521691
	τ_0 =	-1.3563630	-2.6538460	-2.9311020
Herschel-Bulkley	k =	4.7667230	5.6488710	5.5513660
	n =	0.3928665	0.3271196	0.3134886
	τ_0 =	3.1963780	3.2891460	3.3233780
Bingham	k =	0.6601973	0.4930454	0.3866163
	τ_0 =	1.8153170	1.9109070	1.9495080
Casson	k =	0.5785639	0.4945216	0.4358949
	τ_0 =	-0.1059985	-0.2436122	-0.3677781
	τ_0 =	3.6726350	3.5344320	3.3358800
Robertson-Stiff	k =	3.6726350	3.5344320	3.3358800
	n =	0.4535405	0.4224767	0.4083378

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°6.8: PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE MODELOS

Modelo	5°Brix			20°C 10°Brix			15°Brix		
	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE
Ostwald-De Waele	0.9908681	0.9904333	0.0656239	0.9898032	0.9893397	0.0708550	0.9949274	0.9947160	0.0519592
Herschel-Bulkley	0.9983052	0.9981357	0.0282708	0.9987750	0.9986584	0.0245412	0.9973907	0.9971638	0.0372857
Bingham	0.8775131	0.8716804	0.2403401	0.8620786	0.8558074	0.2604077	0.9145660	0.9110063	0.2132366
Casson	0.9448897	0.9422444	0.1612414	0.9371141	0.9342556	0.1758375	0.9652861	0.9638396	0.1359247
Robertson-Stiff	0.9926331	0.9918964	0.0589420	0.9943115	0.9937698	0.0528851	0.9964927	0.9961877	0.0432049

Modelo	5°Brix			30°C 10°Brix			15°Brix		
	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE
Ostwald-De Waele	0.9960287	0.9958396	0.0432759	0.9961627	0.9959882	0.0434381	0.9943966	0.9941631	0.0546101
Herschel-Bulkley	0.9996558	0.9996214	0.0127399	0.9996651	0.9996332	0.0128318	0.9973907	0.9971638	0.0372857
Bingham	0.9029198	0.8982989	0.2139669	0.9061869	0.9019227	0.2147666	0.9127231	0.9090865	0.2155243
Casson	0.9607274	0.9577572	0.1360901	0.9621891	0.9604704	0.1363463	0.9629601	0.9614168	0.1404046
Robertson-Stiff	0.9865352	0.9851887	0.0798860	0.9991836	0.9991058	0.0110097	0.9991327	0.9990573	0.0135873

Modelo	5°Brix			40°C 10°Brix			15°Brix		
	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE	R ²	R ² adj	RMSE
Ostwald-De Waele	0.9940306	0.9937463	0.0530577	0.9947324	0.9944816	0.0498410	0.9938588	0.9933946	0.0580942
Herschel-Bulkley	0.9994909	0.9994400	0.0154946	0.9993127	0.9992440	0.0180031	0.9990167	0.9989312	0.0228766
Bingham	0.9005350	0.8957985	0.2165791	0.9029717	0.8983513	0.2139097	0.9111876	0.9074871	0.2174118
Casson	0.9575181	0.9554952	0.1415413	0.9594404	0.9575090	0.1383019	0.9618611	0.9602719	0.1424724
Robertson-Stiff	0.9950549	0.9945604	0.0482913	0.9988225	0.9987048	0.0235644	0.9995931	0.9995578	0.0147154

Fuente: Elaboración propia

VII DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

Los datos experimentales obtenidos para las dispersiones elaboradas con la pulpa de níspero de palo se han representado para obtener las curvas de fluidez o reogramas que correlacionan el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de deformación (D), mostrados en las figuras N°4.1 a N°6.3.

Los reogramas τ vs D obtenidos nos muestran que para las dispersiones elaboradas con la pulpa de níspero de palo, la velocidad de deformación en cualquier punto está determinada por el esfuerzo de corte aplicado en ese punto y en ese instante, y la relación entre estas nos permite determinar la viscosidad aparente, que no es constante.

Esto nos permite inferir que estas dispersiones tienen el comportamiento de un fluido no newtoniano que se caracteriza por presentar una curva de fluidez no lineal o que no pasa por el origen.

De otro lado, la forma que presentan los reogramas τ vs D indican que inicialmente a mayor tensión de esfuerzo, la velocidad de deformación se incrementa ligeramente; pero después para pequeños cambios de tensión de esfuerzo, los cambios en las velocidades de deformación son mayores.

Esto significa que la viscosidad aparente va decreciendo conforme se incrementa la velocidad de deformación, tal como se puede observar en los reogramas μ_a vs D , mostrados en las figuras N°6.4 a N°6.6.



El comportamiento observado en las dispersiones elaboradas con pulpa de níspero de palo nos señala que a mayor velocidad de deformación el fluido se adelgaza, lo que corresponde al comportamiento de un fluido pseudoplástico.

La representaciones de los datos experimentales presentadas en las figuras N°6.4 y N°6.5 señalan que la influencia de la temperatura sobre la viscosidad aparente es positiva.

Los valores obtenidos para las dispersiones de 5°Brix, 10°Brix y 15°Brix indican que las viscosidades aparentes a son menores a mayor temperatura. Sin embargo cabe señalar que al comparar los valores de viscosidad aparente dentro del rango de 20°C - 40°C, la diferencia no es muy marcada.

La representaciones de los datos experimentales presentadas en las figuras N°6.6 y N°6.7 señalan que, dentro del rango de temperaturas 20°C – 40°C, la influencia de la concentración sobre la viscosidad aparente no es significativa para las dispersiones de 5°Brix y 10°Brix, pero al comparar estos valores con respecto a las viscosidades aparentes para dispersiones de 15°Brix, los valores de viscosidad son mucho mayores.

En lo que respecta al modelado de las curvas de fluidez, se realizó un ajuste de los datos experimentales que relacionan el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, utilizando los cinco modelos propuestos en Tabla N°4.3: Ostwald-De Waele, Herschel-Bulkley, Bingham, Casson y Robertson-Stiff.

Se han evaluado los coeficientes y constantes correspondientes a cada modelo mediante el programa matemático para ecuaciones no

lineales Polymath 6.10 Professional Release, los que se han presentado en las tablas N°6.5, N°6.6 y N°6.7.

Además, se han calculado los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{adj} , y se realizó el análisis de residuales calculando la raíz del error cuadrático medio (RMSE), presentados en las tablas N°6.8 y se han utilizado estos parámetros estadísticos para la selección de los modelos que correlacionaban adecuadamente los datos experimentales, tomando como criterio de selección los valores más altos para los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{adj} , y los menores valores de RMSE.

Para todas las condiciones de temperatura y concentración de las dispersiones en las que se realizaron las pruebas experimentales, los valores obtenidos de los coeficientes de determinación R^2 y R^2_{adj} son mayores a 0.99 en los modelos Ostwald-De Waele, Herschel-Bulkley, y Robertson-Stiff con excepción de los modelos de Bingham y Casson que arrojan valores menores, por lo que estos modelos se han descartado.

Se han obtenido los mayores valores de R^2 y R^2_{adj} y los menores valores de RMSE para el modelo de Herschel-Bulkley en dispersiones de 5°Brix - 15°Brix a la temperatura de 20°C, en dispersiones de 5°Brix - 10°Brix a las temperaturas de 20°C y 30°C. En cambio, se han obtenido los mayores valores de R^2 y R^2_{adj} y los menores valores de RMSE para el modelo de Robertson-Stiff en dispersiones de 15°Brix a las temperaturas de 30°C y 40°C.

Basado en lo señalado anteriormente, se ha determinado que los modelos más adecuados para representar los datos experimentales son el modelo de Herschel-Bulkley, seguido del modelo de Robertson-Stiff, cuyas constantes se muestran en la tabla N°7.1.



Tabla N°7.1: CONSTANTES DE MODELOS HERSCHEL-BULKLEY Y ROBERTSON-STIFF

5°Brix				
Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Herschel-Bulkley	$\tau_0 =$	-2.9746170	-1.7455370	-2.4368420
	$k =$	4.3800310	3.0204950	3.4252240
	$n =$	0.2799157	0.3405529	0.3134536
Robertson-Stiff	$\tau_0 =$	-0.7549279	-1.1376190	-1.1969590
	$k =$	2.2855590	2.0474650	1.9460090
	$n =$	0.3813748	0.3995147	0.3993592

10°Brix				
Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Herschel-Bulkley	$\tau_0 =$	-3.8807970	-1.8032280	-2.1888940
	$k =$	5.3292510	3.0291720	3.2653240
	$n =$	0.2440908	0.3409028	0.3200432
Robertson-Stiff	$\tau_0 =$	-0.8696277	-0.6628107	-0.8136389
	$k =$	2.4970270	1.9171380	1.8841490
	$n =$	0.3538622	0.4145362	0.4065076

15°Brix				
Modelo	Constantes	20°C	30°C	40°C
Herschel-Bulkley	$\tau_0 =$	-1.3563630	-2.6538460	-2.9311020
	$k =$	4.7667230	5.6488710	5.5513660
	$n =$	0.3928665	0.3271196	0.3134886
Robertson-Stiff	$\tau_0 =$	-0.1059985	-0.2436122	-0.3677781
	$k =$	3.6726350	3.5344320	3.3358800
	$n =$	0.4535405	0.4224767	0.4083378

Elaboración propia

7.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares

Se han encontrado estudios similares para la evaluación del comportamiento reológico de pulpas de otros productos de origen vegetal.

Así tenemos los casos de pulpas de durazno de 12.5 a 28.3 °Brix de concentración y temperaturas de 30°C a 50°C (Muñoz, 2012), guanábana de 15 a 30°Brix de concentración y temperaturas de 30°C a 60°C (Márquez, 2012), mango de 15 a 40 °Brix de concentración y temperaturas de 10°C a 50°C (Figueroa, 2017) y pomelo de 13 a 27 °Brix de concentración y temperaturas de 25°C a 65 °C (Silva, 2015).

En todos estos casos se ha determinado que el comportamiento reológico corresponde al de un fluido no newtoniano pseudoplástico, coincidente con los resultados obtenidos para el níspero de palo. Sin embargo, en cuanto al modelo que describe el comportamiento reológico han concluido que es el modelo de Ostwald – De Waele o la ley de potencia el más adecuado. Solo en el caso de la guanábana han encontrado como modelo adecuado al modelo de Herschel – Bulkley.

Del mismo modo, en el caso de la pulpa de noni (Alvis, 2016) y de papaya (Quintana, 2016) se ha determinado que el comportamiento reológico corresponde al de un fluido no newtoniano pseudoplástico.



VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- a) El comportamiento reológico de las dispersiones de níspero de palo para concentraciones de 5°Brix – 15°Brix y dentro del rango de temperaturas de 20°C - 40°C corresponde a un fluido no newtoniano pseudoplástico.
- b) El comportamiento reológico de la pulpa de níspero de palo se describe adecuadamente mediante el modelo de Herschel-Bulkley, seguido del modelo de Robertson-Stiff.
- c) La viscosidad aparente de las dispersiones de pulpa de níspero de palo disminuye con el incremento de la temperatura.
- d) La viscosidad aparente de las dispersiones pulpa de níspero de palo aumentan con el incremento de la concentración.

8.2 Recomendaciones

- a) Evaluar el comportamiento reológico de dispersiones de pulpas azucaradas de níspero de palo.
- b) Evaluar el comportamiento reológico de dispersiones de pulpa de níspero de palo a temperaturas mayores a 40°C y concentraciones mayores a 15°Brix.



IX. REFERENCIALES

- 1 Alvis, A., Arrazola, G. & García, C. (Enero 2016) *Comportamiento reológico de la pulpa de noni (Morinda citrifolia, L.)*. Research Gate.
- 2 Andrade, D.; Ramírez, E.; Montes, E.; Pérez, O.; Bustamante, C. & Mora, B. (Agosto 2010). *Efecto de la temperatura em el comportamieto reológico de la pulpa de zapote (Calocarpum sapota Merr)*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Vol. 33 N°2: 138 – 144.
- 3 Arroyo, Y.; Carrasco, M.; Bueno, A.; Cardeña, R. & Luízar, C. (Octubre – Diciembre 2008). *Obtención y caracterización fisicoquímica y funcional de las fibras dietéticas del níspero común (Mespilus germanica)*, Revista de la Sociedad Química del Perú. Vol. 74 N°4: 269 – 281.
- 4 Altan, A. & Maskann, M. (Abril 2005). *Rheological behavior of pomegranate (Punica granatum L.) juice and concentrates*. International Journal of Food Science and Technology. Vol. 36 N°2: 68 – 77.
- 5 Barnes, H.; Hutton, J. & Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. Amsterdam: Elsevier Science.
- 6 Carrasco, L. (2011). *Fenómenos de Transporte*. Lima: Editorial Macro. Segunda Edición.
- 7 Cepeda, E.; Hermosa, M. & Llorens, F. (Marzo 2002). *Rheological behavior of blueberry cloudy juice (Vaccinium corymbosum L.)*. International Journal of Food Science and Technology. Vol. 37 N°3: 271 – 276.



- 8 Darby, R. (2001). *Chemical engineering fluid mechanics*. (2da ed.). New York: Marcel Dekker Inc.
- 9 De Hombre Morgado, R. (2002). *Reología y Textura de Alimentos Dirigido a la Industria del Chocolate*. Centro de Documentación e Información Científico-Técnica Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia.
- 10 Fennema, O. (1982). *Introducción a la ciencia de los alimentos*. Barcelona: Editorial REVERTE S.A.
- 11 Figueroa, J.; Barragan, K. & Salcedo, J.(2017). "Comportamiento reológico en pulpa edulcorada de mango" (*Mangifera indica L. cv. Magdalena River*). Ciencia y Tecnología Agropecuaria. Vol. 18 N°3: 615 – 627.
- 12 Gamarra, H. (2013). *Caracterización del comportamiento reológico de pulpa de aguaymanto (Physalis Peruviana L.) a diferentes concentraciones y temperaturas*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- 13 Goodwin, J. & Hughes, R. (2008). *Rheology for chemists: An introduction*. Londres: Royal Society of Chemistry Publishing.
- 14 Huaranga, E. & Matos, A. (2011). *Importancia de los parámetros reológicos de la pulpa de capulí (Physalis peruviana L.) a diferentes temperaturas de procesamiento*. I Congreso Nacional de Investigación. Lima: Universidad Peruana Unión.
- 15 Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. (2011). *Operaciones Unitarias en la ingeniería de alimentos*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- 16 Ibarz, A & Pagan, J. (1987). *Rheology of raspberry juices*. Journal of Food Engineering. Vol. 6 N°4: 269 - 289.



- 17 Ibarz, A; Vicente, M. & Graell, J. (Setiembre 1987). *Rheological behavior of apple juice and pear juice and their concentrates*. Journal of Food Engineering. Vol. 6 N°4: 257 – 267.
- 18 Irgens, F. (2014). *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Switzerland: Springer International Publishing.
- 19 Kaya, A. & Sözer, N. (Febrero 2005). *Rheological behavior of sour pomegranate juice concentrates (Punica granatum L.)*. International Journal of Food Science and Technology. Vol. 40 N°1: 223 – 227.
- 20 Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A. & Dincer, I. (2014). *A review on thin layer drying - Curve equations*. Drying technology: An international Journal. Vol. 32 N°7: 757 – 773.
- 21 Leandro, M. (2000). *Estudio tecnológico para la elaboración de mermelada mixta de maca (Lepidium meyenii Walpers) y níspero (Mespilus germánica)*. Tesis Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga – Ayacucho.
- 22 Malkin, A. & Isayev, A. (2017). *Rheology: Concepts, methods and applications*. Toronto: Chemtec Publishing
- 23 Marquez, L.; Pretell, C. & Siche, R. (2012). *Efecto de la temperatura y concentración de sólidos solubles sobre las propiedades reológicas de la pulpa de guanábana (Annona muricata L.)*. Pueblo Continente. Vol. 23 N°1: 113-124.
- 24 Matos, A. & Aguilar, D. (2010) *Influencia de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (Opuntia ficus Indica)*. Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Vol. 1 N°1: 58 - 68.
- 25 Muller, G. (1998). *Introducción a la reología de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia.

- 26 Muñoz, E.; Rubio, L. & Cabeza, M. (Abril 2012) *Comportamiento de flujo y caracterización físico química de pulpas de durazno*. Scientia Agropecuaria. N°2: 107-116.
- 27 Ortega, F.; Salcedo, E.; Arrieta, R. & Torres, R. (2015). *Efecto de la temperatura y concentración sobre las propiedades reológicas de la pulpa de mango variedad Tommy Atkins*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- 28 Palomino, F. (2000). *Estudio Tecnológico para la producción de conserva de níspero (Mespilus germanica)*. Tesis para optar el Título de Ingeniero en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- 29 Panchi, A. (2013). *Determinación de parámetros reológicos en bebidas de frutas con diferentes concentraciones de sólidos solubles mediante el uso del equipo universal TA-XT2i*. Tesis de grado de la Universidad Nacional de Ambato - Ecuador.
- 30 Primo, E. (1978). *Química agrícola*. Madrid: Editorial Alhambra S.A. 1 ed.
- 31 Quintana, S; Granados, C. & García, L. (2016). *Propiedades reológicas de la pulpa de papaya (Carica papaya)*. Información Tecnológica. Vol. 28 N°4: 11-16
- 32 Quintáns, L. (2009). *Reología de productos alimentarios*. Tesis Doctoral Universidad Santiago de Compostela - España.
- 33 Quintero, V., Duque, A.; & Giraldo, G. (Julio – Diciembre 2012). *Evaluación de viscosidad y color en la pulpa de mango común (Mangifera indica L.)*. Temas Agrarios. Vol. 12 N°2: 66 – 76.
- 34 Ramírez, J. (2006). *Introducción a la reología de los alimentos*. Colombia: Universidad del Valle.

- 35 Rao, M. (2014). *Rheology of fluid, semisolid and solid foods. Principles and application*. 3rd ed. New York: Springer Science.
- 36 Roudot, A. (2004). *Reología y análisis de la textura de los alimentos*. Zaragoza: Editorial Acribia.
- 37 Silva, M.; Agudelo, C.; Camacho, M.; Martínez-Navarrete, N. (2015). *Estudio del comportamiento reológico de zumo de fruta obtenido a partir de pomelo liofilizado..* Tesis de máster Universidad Politécnica de Valencia – España.
- 38 Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Michigan: Freeman Press.
- 39 Vargas, Y.; Pisfill, E.; Bautista, N. & Arias, G. (2009). *Estudio químico bromatológico y elaboración de néctar de Mespilus germánica L. (níspero de palo) procedente de Ayacucho. Ciencia e Investigación*. Vol. 12 N° 2: 90 – 94.
- 40 Velasquez, H. (2006). *Reología de fluidos y su aplicación en el área de los alimentos*. Universidad Nacional de Colombia
- 41 Vitali, A. & Rao, M. (1984). *Flow properties of low pulp concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration. Journal of Food Science*. Vol. 49 N°3: 882 – 888.



APÉNDICES

B

APENDICE N°1: VISCOSIDAD APARENTE



5° Brix								
20 °C			30 °C			40 °C		
D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)
0.62	1.00	1.61	0.74	1.00	1.35	0.88	1.00	1.14
0.98	1.50	1.53	1.07	1.50	1.40	1.61	1.50	0.93
1.57	1.99	1.27	1.94	1.99	1.03	2.25	1.99	0.88
2.33	2.49	1.07	2.85	2.49	0.87	3.65	2.49	0.68
3.11	2.99	0.96	4.01	2.99	0.75	4.70	2.99	0.64
4.53	3.49	0.77	4.95	3.49	0.71	5.95	3.49	0.59
5.75	3.98	0.69	6.86	3.98	0.58	7.08	3.98	0.56
7.15	4.48	0.63	8.31	4.48	0.54	8.92	4.48	0.50
8.62	4.98	0.58	10.80	4.98	0.46	11.50	4.98	0.43
10.90	5.48	0.50	12.60	5.48	0.43	14.30	5.48	0.38
12.50	5.97	0.48	15.60	5.97	0.38	17.40	5.97	0.34
15.30	6.47	0.42	18.90	6.47	0.34	20.70	6.47	0.31
17.20	6.97	0.41	22.40	6.97	0.31	25.10	6.97	0.28
20.80	7.47	0.36	26.20	7.47	0.29	30.00	7.47	0.25
24.80	7.96	0.32	30.40	7.96	0.26	34.70	7.96	0.23
28.90	8.46	0.29	35.40	8.46	0.24	40.10	8.46	0.21
35.10	8.96	0.26	40.70	8.96	0.22	46.10	8.96	0.19
42.10	9.46	0.22	46.70	9.46	0.20	52.80	9.46	0.18
50.20	9.95	0.20	53.00	9.95	0.19	60.10	9.95	0.17
57.80	10.50	0.18	59.80	10.50	0.18	70.50	10.5	0.15
62.60	10.90	0.17	67.60	10.90	0.16	76.70	10.9	0.14
71.00	11.40	0.16	76.00	11.40	0.15	86.00	11.4	0.13
76.85	11.90	0.15	85.00	11.90	0.14	96.10	11.9	0.12

10°Brix								
20 °C			30 °C			40 °C		
D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_a (Pa-s)
0.74	1.00	1.35	0.84	1.00	1.19	0.99	1.00	1.01
1.08	1.50	1.39	1.17	1.50	1.28	1.36	1.50	1.10
1.37	1.99	1.45	1.84	1.99	1.08	2.04	1.99	0.98
1.83	2.49	1.36	2.85	2.49	0.87	3.15	2.49	0.79
2.61	2.99	1.15	4.21	2.99	0.71	4.91	2.99	0.61
4.08	3.49	0.86	5.25	3.49	0.66	5.95	3.49	0.59
5.35	3.98	0.74	6.76	3.98	0.59	6.96	3.98	0.57
6.75	4.48	0.66	8.31	4.48	0.54	8.42	4.48	0.53
8.72	4.98	0.57	10.80	4.98	0.46	11.50	4.98	0.43
10.20	5.48	0.54	12.60	5.48	0.43	14.30	5.48	0.38
12.50	5.97	0.48	15.60	5.97	0.38	17.40	5.97	0.34
15.30	6.47	0.42	18.90	6.47	0.34	20.70	6.47	0.31
18.20	6.97	0.38	22.40	6.97	0.31	25.10	6.97	0.28
21.00	7.47	0.36	27.20	7.47	0.27	30.00	7.47	0.25
24.80	7.96	0.32	31.40	7.96	0.25	35.70	7.96	0.22
28.90	8.46	0.29	36.40	8.46	0.23	41.10	8.46	0.21
36.10	8.96	0.25	40.70	8.96	0.22	46.10	8.96	0.19
42.10	9.46	0.22	46.70	9.46	0.20	52.80	9.46	0.18
52.20	9.95	0.19	53.00	9.95	0.19	60.10	9.95	0.17
59.80	10.50	0.18	59.80	10.50	0.18	69.30	10.50	0.15
67.60	10.90	0.16	67.60	10.90	0.16	76.70	10.90	0.14
76.00	11.40	0.15	76.00	11.40	0.15	86.00	11.40	0.13
85.00	11.90	0.14	85.00	11.90	0.14	96.10	11.90	0.12
94.90	12.40	0.13	91.90	12.40	0.13			



15° Brix								
20 °C			30 °C			40 °C		
D (1/s)	τ (Pa)	μ_0 (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_0 (Pa-s)	D (1/s)	τ (Pa)	μ_0 (Pa-s)
0.16	1.00	6.25	0.28	1.00	3.53	0.42	1.00	2.38
0.20	1.50	7.50	0.39	1.50	3.85	0.49	1.50	3.04
0.39	1.99	5.10	0.54	1.99	3.69	0.68	1.99	2.93
0.57	2.49	4.37	0.82	2.49	3.04	0.93	2.49	2.68
0.84	2.99	3.56	0.96	2.99	3.11	1.15	2.99	2.60
1.24	3.49	2.81	1.24	3.49	2.81	1.44	3.49	2.42
1.51	3.98	2.64	1.74	3.98	2.29	1.99	3.98	2.00
1.93	4.48	2.32	1.98	4.48	2.26	2.42	4.48	1.85
2.25	4.98	2.21	2.45	4.98	2.03	3.02	4.98	1.65
2.64	5.48	2.08	2.87	5.48	1.91	3.63	5.48	1.51
2.93	5.97	2.04	3.54	5.97	1.69	4.16	5.97	1.44
3.51	6.47	1.84	4.27	6.47	1.52	5.39	6.47	1.20
3.97	6.97	1.76	4.89	6.97	1.43	6.43	6.97	1.08
4.52	7.47	1.65	6.06	7.47	1.23	7.63	7.47	0.98
4.99	7.96	1.60	7.05	7.96	1.13	8.96	7.96	0.89
6.01	8.46	1.41	8.08	8.46	1.05	10.50	8.46	0.81
6.59	8.96	1.36	9.45	8.96	0.95	11.70	8.96	0.77
7.90	9.46	1.20	10.30	9.46	0.92	13.10	9.46	0.72
8.75	9.95	1.14	11.90	9.95	0.84	14.80	9.95	0.67
10.05	10.50	1.04	13.20	10.50	0.80	16.70	10.50	0.63
11.10	10.90	0.98	14.80	10.90	0.74	18.40	10.90	0.59
12.70	11.40	0.90	16.30	11.40	0.70	20.80	11.40	0.55
14.00	11.90	0.85	18.03	11.90	0.66	23.10	11.90	0.52
15.20	12.40	0.82	19.90	12.40	0.62	25.40	12.40	0.49
16.60	12.90	0.78	21.80	12.90	0.59	28.10	12.90	0.46

APÉNDICE N°2: MODELOS REOLÓGICOS



MODELO DE OSTWALD: $\tau = k \cdot D^n$

5°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
k	1.990494	0.1689476
n	0.4157095	0.023244

R ²	0.9908681
R ² adj	0.9904333
RMSE	0.0656239
Varianza	0.1084826

5°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
k	1.729254	0.1074209
n	0.440038	0.016519

R ²	0.9960287
R ² adj	0.9958396
RMSE	0.0432759
Varianza	0.0471768

5°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
k	1.63471	8.231E-06
n	0.4401226	1.296E-06

R ²	0.9940306
R ² adj	0.9937463
RMSE	0.0530577
Varianza	0.0709141

10°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
k	2.125221	0.1824272
n	0.3928147	0.0225788

R ²	0.9898032
R ² adj	0.9893397
RMSE	0.0708055
Varianza	0.1312603

10°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
k	1.717769	0.1054992
n	0.4405907	0.015917

R ²	0.9961627
R ² adj	0.9959882
RMSE	0.0434361
Varianza	0.049397

10°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
k	1.853709	7.822E-06
n	0.4372288	1.217E-06

R ²	0.9947324
R ² adj	0.9944816
RMSE	0.049841
Varianza	0.0625762

15°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
k	3.491312	0.1510977
n	0.4727301	0.0188375

R ²	0.9949274
R ² adj	0.994716
RMSE	0.0519592
Varianza	0.0760433

15°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
k	3.19095	1.4600E-05
n	0.4578365	1.786E-06

R ²	0.9943966
R ² adj	0.9941631
RMSE	0.0546101
Varianza	0.0840004

15°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
k	2.910763	0.1621328
n	0.4521691	0.0199676

R ²	0.9936588
R ² adj	0.9933946
RMSE	0.0580942
Varianza	0.0950606

MODELO DE HERSCHEL – BULKLEY: $\tau = \tau_0 + k \cdot D^n$

5°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9983052
τ_0	-2.974617	0.1176784	R ² adj	0.9981357
k	4.380031	0.0707009	RMSE	0.0282708
n	0.2799157	0.0035207	Varianza	0.0211399

5°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9996558
τ_0	-1.745537	0.0086428	R ² adj	0.9996214
k	3.020495	0.0029538	RMSE	0.0127399
n	0.3405529	0.0002678	Varianza	0.004293

5°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9994909
τ_0	-2.436842	0.0285756	R ² adj	0.99944
K	3.425224	0.0107385	RMSE	0.0154946
n	0.3134536	0.0008135	Varianza	0.0063502

10°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.998775
τ_0	-3.880797	0.1037335	R ² adj	0.9986584
k	5.329251	0.0667235	RMSE	0.0245412
n	0.2440908	0.0026008	Varianza	0.0165194

10°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9996651
τ_0	-1.803228	0.3167746	R ² adj	0.9996332
k	3.029172	0.2533438	RMSE	0.0128318
n	0.3409028	0.0143451	Varianza	0.0045163

10°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	-2.188894	0.5209706
k	3.265324	0.4240136
n	0.3200432	0.0214797

R ²	0.9993127
R ² adj	0.999244
RMSE	0.0180031
Varianza	0.0085728

15°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	-1.356363	0.7131136
k	4.766723	0.7015565
n	0.3928665	0.0376394

R ²	0.9973907
R ² adj	0.9971638
RMSE	0.0372657
Varianza	0.0408166

15°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	-2.653846	0.7148323
k	5.648871	0.6919229
n	0.3271196	0.0231277

R ²	0.9994583
R ² adj	0.9994111
RMSE	0.0169803
Varianza	0.0084744

15°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	-2.931102	0.7447702
k	5.551366	0.7076485
n	0.3134886	0.0255055

R ²	0.9990167
R ² adj	0.9989312
RMSE	0.0228766
Varianza	0.0153815



MODELO DE BINGHAM: $\tau = \tau_0 + k \cdot D$

5°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.297422	0.750118
k	0.1300303	0.0220504

R ²	0.8775131
R ² adj	0.8716804
RMSE	0.2403401
Varianza	1.455087

5°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.083847	0.6859468
K	0.1231684	0.0183313

R ²	0.9029198
R ² adj	0.8982969
RMSE	0.2139669
Varianza	1.153267

5°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.100593	0.692963
k	0.1079794	0.0162884

R ²	0.900535
R ² adj	0.8957985
RMSE	0.2165791
Varianza	1.181597

10°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.577427	0.7912473
k	0.1111924	0.0196661

R ²	0.8620766
R ² adj	0.8558074
RMSE	0.2604077
Varianza	1.775447

10°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.174775	0.6856159
k	0.1168205	0.0166203

R ²	0.9061869
R ² adj	0.9019227
RMSE	0.2147666
Varianza	1.207628

10°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.098146	0.6841925
k	0.1081272	0.0160879

R ²	0.9029717
R ² adj	0.8983513
RMSE	0.2139097
Varianza	1.15265

15°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.196378	0.6905861
k	0.6601973	0.0850129

R ²	0.914566
R ² adj	0.9110063
RMSE	0.2132366
Varianza	1.280734

15°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.289146	0.6893879
k	0.4930454	0.0642348

R ²	0.9127231
R ² adj	0.9090865
RMSE	0.2155243
Varianza	1.308362

15°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	3.323378	0.6924164
k	0.3866163	0.050853

R ²	0.9111876
R ² adj	0.9074871
RMSE	0.2174118
Varianza	1.331379

MODELO DE CASSON: $\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + k \cdot D^{1/2}$

5°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	2.045829	0.4835202
k	0.2447972	0.0282939

R ²	0.9448697
R ² adj	0.9422444
RMSE	0.1612414
Varianza	0.6549222

5°BRIX 30°

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.844666	0.4077447
k	0.2432615	0.0238178

R ²	0.9607274
R ² adj	0.9588572
RMSE	0.1360901
Varianza	0.4665404

5°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.851748	0.4235014
k	0.2277842	0.0231671

R ²	0.9575181
R ² adj	0.9554952
RMSE	0.1415413
Varianza	0.5046644

10°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	2.300979	0.5238926
k	0.2220411	0.0266781

R ²	0.9371141
R ² adj	0.9342556
RMSE	0.1758375
Varianza	0.8095115

10°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.899062	0.405838
k	0.2371507	0.0222293

R ²	0.9621891
R ² adj	0.9604704
RMSE	0.1363463
Varianza	0.4867284



10°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.860612	0.4144758
k	0.2274256	0.0226189

R ²	0.9594404
R ² adj	0.957509
RMSE	0.1383019
Varianza	0.4818288

15°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.815317	0.371417
k	0.5785639	0.0466779

R ²	0.9652861
R ² adj	0.9638396
RMSE	0.1359247
Varianza	0.5203939

15°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.910907	0.4103562
k	0.4945216	0.0437968

R ²	0.9629601
R ² adj	0.9614168
RMSE	0.1404046
Varianza	0.5552624

15°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza
τ_0	1.949508	0.4171684
k	0.4358949	0.03916

R ²	0.9618611
R ² adj	0.9602719
RMSE	0.1424724
Varianza	0.5717378



MODELO DE ROBERTSON – STIFF: $\tau = k \cdot (\tau_0 + D)^n$

5°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9926331
k	2.285559	0.0004155	R ² adj	0.9918964
τ_0	-0.7549279	0.0023749	RMSE	0.058942
n	0.3813748	5.021E-05	Varianza	0.0918916

5°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9865352
k	2.047465	0.3569336	R ² adj	0.9851887
τ_0	-1.137619	0.9939195	RMSE	0.079686
n	0.3995147	0.0439291	Varianza	0.1679538

5°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9950549
k	1.946009	9.164E-06	R ² adj	0.9945604
τ_0	-1.196959	9.392E-05	RMSE	0.0482913
n	0.3993592	1.223E-06	Varianza	0.0616828

10°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9943115
k	2.497027	0.0001232	R ² adj	0.9937698
τ_0	-0.8696277	0.0005884	RMSE	0.0528851
n	0.3538622	1.31E-05	Varianza	0.0767131

10°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9991836
k	1.917138	3.581E-06	R ² adj	0.9991058
τ_0	-0.6628107	2.509E-05	RMSE	0.0200349
n	0.4145362	4.869E-07	Varianza	0.0110097



10°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9988225
k	1.884149	4.328E-05	R ² adj	0.9987048
τ_0	-0.8136893	0.0003029	RMSE	0.0235644
n	0.4065076	5.953E-06	Varianza	0.0146872

15°BRIX 20°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9964927
k	3.672635	0.1656886	R ² adj	0.9961877
τ_0	-0.1059985	0.051734	RMSE	0.0432049
n	0.4535405	0.0189743	Varianza	0.0548637

15°BRIX 30°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9991327
k	3.534432	6.512E-06	R ² adj	0.9990573
τ_0	-0.2436122	6.238E-06	RMSE	0.0214851
n	0.4224767	7.264E-07	Varianza	0.0135673

15°BRIX 40°C

Variable	Valor	95% confianza	R ²	0.9995931
k	3.33588	4.209E-05	R ² adj	0.9995578
τ_0	-0.3677781	5.131E-05	RMSE	0.0147154
n	0.4083378	4.577E-06	Varianza	0.0063645

P

ANEXOS

P



MATRIZ DE CONSISTENCIA.

“COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE DISPERSIONES ELABORADAS CON PULPA DE NÍSPERO DE PALO (*Mespilus germánica L.*)”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuál es el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con la pulpa del nispero de palo?	Obtener los parámetros reológicos característicos de las dispersiones de pulpa de nispero de palo	Mediante la aplicación de fuerzas mecánicas a dispersiones elaboradas con pulpa de nispero de palo se podrá establecer su comportamiento reológico.	X = Comportamiento reológico de dispersiones de pulpa de nispero de palo	Propiedad reológica	<ul style="list-style-type: none">• Fuerza de cizalla• Gradiente de velocidad	Reometría
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuál es la influencia de la concentración sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de nispero de palo?	Determinar el efecto de la concentración sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de nispero de palo.	El comportamiento reológico de las dispersiones de pulpa de nispero de palo es influenciado por la concentración.	X ₁ = Concentración de pulpa de nispero de palo	% pulpa	° Brix	Refractometría
¿Cuál es la influencia de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de nispero de palo?	Determinar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las dispersiones elaboradas con pulpa de nispero de palo.	El comportamiento reológico de las dispersiones de pulpa de nispero de palo es influenciado por la temperatura.	X ₂ = Temperatura	Energía	°C	Ensayo en laboratorio

MODELOS TEÓRICOS PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO

Denominación/ autor	Función reológica	Viscosidad aparente	Viscosidad diferencial	Nro. parámetros	Función alterna
Prandtl - Eyring	$\tau = A \operatorname{arcsenh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$	$\frac{A \operatorname{arcsenh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)}{\frac{du}{dy}}$	$\frac{A}{B \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dy} \right)^2}}$	2: A, B	$\frac{du}{dy} = B \operatorname{senh} \frac{\tau}{A}$
Powell - Eyring	$\tau = C \frac{du}{dy} + A \operatorname{arcsenh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)$	$C + \frac{A \operatorname{arcsenh} \left(\frac{1}{B} \frac{du}{dy} \right)}{\frac{du}{dy}}$	$C + \frac{A}{B \sqrt{1 + \left(\frac{du}{dy} \right)^2}}$	3: A, B, C	
Sutterby	$\tau = M_0 \left[\frac{\operatorname{arcsenh} \left(N \frac{du}{dy} \right)}{N \frac{du}{dy}} \right]^p \frac{du}{dy}$ $0 < p < 1$	$M_0 \left[\frac{\operatorname{arcsenh} \left(N \frac{du}{dy} \right)}{N \frac{du}{dy}} \right]^p$		3: M ₀ , N, P	
Prandtl	$\tau = A \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{du/dy}{C} \right)$			2: A, C	
Eyring	$\tau = \frac{du/dy}{B} + C \operatorname{sen} \left(\frac{\tau}{A} \right)$			3 A, B, C	

Fuente: Carrasco, 2011