

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE INGENIERIA EN ALIMENTOS

**Comportamiento Reológico de Pasta de Murta (*Ugni molinae* Turcz) en
Estado Fresco y Congelado**

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Ingeniería en Alimentos

Luis Armando Cárcamo Alvarado

VALDIVIA – CHILE

2005

PROFESOR PATROCINANTE:

Prof. Dr.-Ing. Kong Shun Ah-Hen

Ingeniero en Alimentos, Dipl.-Ing., Dr.-Ing.

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

PROFESORES INFORMANTES:

Prof. Erwin R. Carrasco Ruiz

Ingeniero Civil Químico

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

Prof. Fernando E. Figuerola Rivas

Ingeniero Agrónomo, M.S. Food Science

Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

*Con amor a
Luisa, Patricia
y Nataly*

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Descripción de la murta	3
2.2	La reología en la industria alimentaria	4
2.3	Clasificación reológica de los alimentos	6
2.3.1	Fluidos newtonianos	8
2.3.2	Fluidos no-newtonianos independiente del tiempo	9
2.3.2.1	Fluidos pseudoplásticos	10
2.3.2.2	Fluidos dilatantes	11
2.3.2.3	Fluidos plásticos	12
2.3.3	Fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo	13
2.3.3.1	Fluidos tixotrópicos	13
2.3.3.2	Fluidos reopéticos	15
2.3.4	Fluidos no newtonianos viscoelásticos	15
2.4	Constantes Teológicas fundamentales	16
2.5	Modelo predictivo de la viscosidad aparente en función de la temperatura y relación de deformación	17
2.6	Determinación de las constantes Teológicas en la práctica	18
2.7	Los fluidos pseudoplásticos en la industria	18
2.8	Conducción de fluidos pseudoplásticos por tuberías	20
2.8.1	Número de Reynolds	20
2.8.2	Distribución de velocidades para un fluido de ley de potencia	22
2.8.2.1	Régimen laminar	23
2.8.2.2	Régimen turbulento	25

3	MATERIAL Y MÉTODO	27
3.1	Lugar de la investigación	27
3.2	Materia prima	27
3.3	Equipos	27
3.4	Metodología	27
3.4.1	Preparación de las muestras	27
3.4.2	Descripción del análisis reológico	30
3.4.3	Cálculo de las constantes reológicas	31
3.5	Diseño Experimental	33
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34
4.1	Característica reológica de la de murta en función del tiempo	34
4.2	Modelos Teológicos para pastas de murta	38
4.2.1	Aplicación del Modelo de OSTWALD-DE-WAELE	39
4.2.2	Aplicación del Modelo de CASSON	42
4.2.3	Aplicación del Modelo de HERSCHEL-BULKLEY	45
4.2.4	Elección del modelo reológico, para las pastas de murta	48
4.3	Efecto de las características físicas de las pastas de murta y de la temperatura sobre el comportamiento reológico	50
4.3.1	Diferencia entre las propiedades Teológicas de pastas a partir de murta fresca y murta descongelada	51
4.3.2	Comparación de pulpa sin azúcar y pulpa azucarada de murta fresca	57
4.3.3	Comparación de pulpa sin azúcar y pulpa azucarada de murta descongelada	60
4.3.4	Variación de la viscosidad en función de la temperatura	62
5	CONCLUSIONES	67
6	RESUMEN	68
	SUMMARY	69

7	BIBLIOGRAFÍA	70
	ANEXOS	77

ÍNDICE DE CUADROS

1	Constantes fundamentales para diferentes tipos de fluidos	17
2	Tipo de régimen de circulación según el número de Reynolds	20
3	Ecuaciones para encontrar el factor- de conversión para la transformación de la VNE en función de la velocidad de rotación	31
4	Factores de conversión para los husillos del viscosímetro R.V.T. Brookfield o equivalente bajo condiciones estándares de medición	32
5	Datos del índice de ruptura para la pulpa de murta descongelada	38
6	Datos obtenidos aplicando el modelo reológico de OSTWALD-de WAELE para diferentes pastas de murta en función de la temperatura	41
7	Datos obtenidos aplicando el modelo reológico de CASSON modificado para diferentes pastas de murta en función de la temperatura	44
8	Datos obtenidos aplicando el modelos reológico de HERSCHEL-BULKLEY para diferentes pastas de murta en función de la temperatura	47
9	Determinación del error estándar (S_{yx}) para los diferentes modelos Teológicos	49
10	Análisis de Varianza para las constantes Teológicas fundamentales	50
11	Datos de la viscosidad relativa de distintos tipos de pasta murta	53
12	Ecuaciones predictivas en función de la concentración y relación de deformación para la determinación de la viscosidad aparente de pulpa de murta fresca	59
13	Ecuaciones predictivas en función de la concentración y relación de deformación para la determinación de la viscosidad aparente de pulpa de murtas descongelada	61

14	Energía de activación, índice de consistencia, índice de comportamiento reológico, y índice de correlación para diferentes tipos de muestra de murta	65
15	Ecuaciones predictivas para las diferentes muestras de pasta de murta	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Reogramas para fluidos newtonianos típicos	9
2	Viscosidad aparente de fluidos independientes del tiempo	10
3	Variación del número de Reynolds crítico con el índice de flujo, para fluidos de la ley de potencia	22
4	Perfil de velocidades para fluidos de la ley de potencia, en función del índice de flujo	24
5	Perfil de velocidades en régimen turbulento	25
g	Variación de $(v_m/v_{máx})$ con el número de Reynolds para régimen turbulento	26
7	Línea de flujo de la preparación de las muestras de murta fresca	28
8	Línea de flujo de la preparación de las muestras de murta descongelada	29
9	Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 1	36
10	Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 2	36
11	Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 3	37
12	Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para diferentes pasta de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de OSTWALD-DE-WAELE	40
13	Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para diferentes pastas de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de CAS SON modificado	43
14	Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para	

	diferentes pastas de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de HERSCHEL-BULKLEY	46
15	Umbral de fluencia versus temperatura para pasta y pulpa de murta	48
16	Viscosidad relativa versus $\ln N$ (rpm) para diferentes temperatura en función del tipo de pasta de murta	56
17	Viscosidad relativa versus $\ln N$ (rpm) para diferentes pasta de murta en función de la temperatura	57
18	Efecto de la concentración de azúcar sobre el índice de consistencia para pulpa de murta fresca con y sin azúcar	59
19	Efecto de la concentración de azúcar sobre el índice de consistencia para pulpa de murta descongelada con y sin azúcar	62
20	Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de temperatura para la murta fresca	63
21	Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de temperatura para la murta descongelada	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Ejemplo de calculo usando el método de MITSCHKA para obtener las constantes fundamentales reológica, y la viscosidad aparente	78
2	Lecturas de la viscosidad newtoniana equivalente para 3 muestra de pulpa de murta descongela	81
3	Resultados de las constantes Teológicas fundamentales para tres tipo de muestras de pulpa de murta descongela	84
4	Datos Teológicos para la pasta de murta fresca	85
5	Datos Teológicos para la pulpa de murta fresca	87
6	Datos Teológicos para la murta fresca con un 15% de azúcar	89
7	Datos Teológicos para la pasta murta descongela	91
8	Datos Teológicos para la pulpa de murta descongela	93
9	Datos Teológicos para la pulpa de murta descongela con un 15% de azúcar	95
10	Cálculos para la obtención de la energía de activación, la constante K_T , y el promedio del índice de comportamiento Teológico	97

NOMENCLATURA

B	Coeficiente de tiempo de ruptura tixotrópica - modelo de Weltmann	-
B_I	Parámetro del modulo de Hahn (fluido tixotrópico)	-
C	Concentración	°Brix
d	Diámetro	m
E_a	Energía de activación	kJ/mol
FC	Factor de conversión método de Mitschka	-
K_I	índice de consistencia para el modelo de Casson modificado	Pa s ⁿ
K	índice de consistencia	Pa s ⁿ
$K_{a\sigma}$	Factor de conversión método de Mitschka	-
KN_V	Factor de conversión	-
K_t	Constante de velocidad en el modulo de Tiu y Boger	s ⁻¹
KT	Constante dependiente de la temperatura Pa s	Pa s ⁿ
l	Longitud	m
M	Coeficiente de ruptura tixotrópico debido al aumento de la velocidad de deformación	- Pa s ⁿ
n_I	índice de comportamiento para el modelo de Casson modificado	-
n	índice de comportamiento reológico	-
n^*	índice de comportamiento reológico aparente	-
N	Velocidad de rotación del rotor	rpm
q	Flujo volumétrico	m ³ /s
R	Constante universal de los gases	kJ/g-mol K
R^2	Coeficiente de determinación	-
Re	Número de Reynolds	-
Re_G	Número de Reynolds modificado	-
t	Tiempo	s

T	Temperatura absoluta	K
v	Velocidad media de flujo en la tubería	m/s
VNE	Viscosidad Newtoniana Equivalente	mPa s o cP
a	Porcentaje de escala de torque	%
y	Relación de deformación	s ⁻¹
η	Viscosidad aparente	Pa s
η'	Viscosidad plástica en el modelo de Bingham	Pa s
μ	Viscosidad dinámica	Pa s
σ_0	Umbral de fluencia	Pa
σ	Esfuerzo de corte	Pa
σ_e	Esfuerzo de corte en equilibrio	Pa
σ_w	Esfuerzo de corte en la pared	Pa

1. INTRODUCCIÓN

La reología en el área de los alimentos es un amplio campo de estudio, en el cual se han realizado importantes investigaciones y utilizado diferentes instrumentos para analizar y modelar el comportamiento reológico de los alimentos. En la presente tesis se describe y se modela el comportamiento reológico de un producto elaborado a partir un fruto autóctono del sur de Chile, la murtila o murta de nombre científico *Ugni molinae* Turcz, utilizando un viscosímetro de rotación, un instrumento de fácil manejo, y de uso generalizado en la industria de alimentos.

Esta investigación se aborda considerando que el comportamiento reológico de los alimentos contribuye al conocimiento de la estructura de éstos. Además la reología se aplica en la industria de los alimentos para el control de la materia prima como también de productos en elaboración, entregando valiosas informaciones indispensables para el control de proceso. Es muy útil para el diseño de máquinas: tolvas, tuberías, bombas, mezcladores, intercambiadores de calor, extrusores, etc., lo que evita posibles sobredimensionamientos que encarecerían el proceso. La reología de fluidos alimenticios es por tanto una valiosa herramienta de ingeniería de procesos, sobre todo en las operaciones unitarias que implican transferencia de calor y cantidad de movimiento.

La descripción del comportamiento reológico de cualquier material ha sido explicado a partir de su estructura básica, aunque en muchos productos alimenticios esto no es siempre posible de lograr claramente. Los productos alimenticios tienen muchos elementos estructurales, los cuales pueden existir en tamaños y formas diferentes, o la composición de éstos puede variar localmente entre muestras. En estos casos a menudo sólo es posible explicar el comportamiento cualitativamente o quizás ser descritos en términos de un modelo matemático, lo cual es sólo una descripción que puede ser aplicable dentro de un rango limitado. Es importante en estos casos entender claramente

que estos modelos son sólo para describir el comportamiento reológico y no para ser interpretados como una definición de ese comportamiento

En la presente tesis se plantea caracterizar el comportamiento reológico de la pasta de murta (*Ugni molinae* Turcz), haciendo uso de las constantes reológicas fundamentales, por medio de la determinación experimental de la viscosidad de ésta. Se plantea por lo tanto la siguiente hipótesis: ¿Posee la pasta de murta un comportamiento reológico adecuado al modelo de Ostwald-de-Waele?

Se estudiaron, por lo tanto, las propiedades reológicas de la murta como una propiedad característica del producto y se analizó su variación tanto en murta fresca como congelada.

Objetivo general

Conocer el comportamiento reológico de la pasta de murta (*Ugni molinae* Turcz) en estado fresco y congelado midiendo la viscosidad en función del esfuerzo de corte usando un equipo con el flujo de Couette (viscosímetro tipo *Brookfield*)

Objetivos específicos

- Determinar la viscosidad aparente a diferentes gradientes de velocidades en tres tipos de preparación de pasta de murta obtenidos de la fruta fresca y congelada (pasta con la fruta entera, pasta con pulpa sin semilla con y sin azúcar) en función de la temperatura en el rango de 30 a 90°C
- Modelar el comportamiento reológico para las pastas de murta a través de la determinación de los índices de consistencia, K , y de comportamiento, n .
- Determinación de la energía de activación, E_a , utilizando la ecuación de Arrhenius, para los tipos de pasta, en función de la temperatura en el rango de 30 a 90°C

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Descripción de la murta

La murta o murtilla (*Ugni molinae* Turcz) es una planta arbustiva, perenne, que crece principalmente en forma silvestre, desarrollándose sola o asociada a otros vegetales arbóreos o arbustivos. Según HEVIA *et al.* (1993) la murta se distribuye entre la VII y la X Región de Chile, en tanto ALBA (1977) describe su presencia hasta la XI Región, principalmente en la cordillera de la costa y en parte de la precordillera Andina.

NOVOA (1982) describió tres variedades de murta en la provincia de Valdivia, diferenciándolas principalmente por el color del fruto. Dentro de estas variedades informa de mediciones de peso del fruto entre 0,34 a 0,50 g y diámetro de fruto entre 1,06 a 1,22 cm. HEVIA *et al.* (1993) distinguió también tres grupos de murtilla entre la VII y X Región, de acuerdo a la coloración de la epidermis del fruto (verde claro a blanco, verde claro a blanco con tonalidades rojas, rojo coral hasta casi negro). A estos frutos se le determinó la presencia de azúcares tales como la fructosa, la glucosa y la sacarosa en fruta fresca, cuyos promedios estuvieron entre 2,42 a 4,07 g /100 g para la fructosa; 1,45 a 1,88 g /100 g para la glucosa y 3,43 a 4,95 g /100 g para la sacarosa. En cuanto al contenido de sólidos solubles en la fruta fresca encontraron valores entre 13,1 y 17,7 %.

Según ALBA (1977) la murta es una planta resistente a las heladas e incluso a la nieve. Es capaz de soportar la sequía propia del sur de Chile durante el verano en el período de madurez del fruto, sin sufrir daño; el rocío de la noche que absorbe a través de sus raíces muy superficiales, le basta. La fruta proveniente de montes bajos y ralos, “fruta de cerro”, tiene un sabor más dulce que la fruta de monte alto, “murta de monte”, donde los murtales producen frutas de bello aspecto de color rojo, pero de sabor ácido por la falta de sol. Las yemas florales comienzan su actividad a fines del invierno, encontrándose en los meses de primavera el botón floral en desarrollo; el período de floración es largo,

termina con plena flor en los últimos días de diciembre. El fruto alcanza su madurez comercial a fines de marzo o abril, dependiendo de los días de sol que se observen durante la temporada verano-otoño.

Actualmente la murta es recolectada para venta directa en mercados locales, y su uso es principalmente para la confección artesanal de mermeladas, dulces y licores.

2.2 La reología en la industria alimentaria

Tomando en cuenta el amplio campo de uso de datos reológicos, viene a ser evidente que las condiciones bajo las cuales las propiedades reológicas son determinadas, son fundamentales para cualquier aplicación práctica.

Los materiales alimenticios son en la mayoría de los casos muy complejos en composición y estructura, así que la relación de los datos reológicos con un esfuerzo de corte en particular es a menudo un tarea difícil. La situación de las pruebas para cualquier medición tiene que ser seleccionado de tal forma que la relación entre los datos reológicos y el esfuerzo de corte sean idénticos o muy similares para las situaciones en las cuales aquellos datos sean finalmente aplicados. Además el uso de los datos publicados puede resultar difícil o aún imposible, si las condiciones de medición se desvían demasiado de las aplicaciones.

Por lo tanto, se debe poner énfasis en la metodología y mediciones comparativas, dado que la mayoría de los alimentos poseen un comportamiento no newtoniano, que exhiben complejos comportamiento reológicos, como por ejemplo la dependencia del tiempo, del esfuerzo de corte. Las comparaciones inter laboratorio llegan a ser mucho más difíciles, y los resultados son influenciados por la elección del instrumento (geometría), rango de esfuerzo de corte, tiempo de la medición, selección de la muestra, y otros factores.

Debido a que las propiedades reológicas de los alimentos líquidos no newtonianos son complejas y muy variadas, lleva a que la mayoría de los equipos de procesamiento usados en la industria de los alimentos, tales como mezcladores, bombas, intercambiadores de calor, etc., debe ser diseñada en consideración de las especificidades de cada producto, lo que indica claramente la necesidad de un

entendimiento del comportamiento reológico de los complejos materiales. Surge entonces especificar cuales son las áreas o etapas en la industria de los alimentos que requerirán mayor atención para la determinación de las propiedades reológicas de los alimentos; éstos según ESCHER (1983) son:

- Ingeniería de proceso, por ejemplo el diseño en planta de equipamiento de bombeo, tubería, dimensiones de válvulas, operaciones de mezcla, etc. y el cálculo de la transferencia de calor, masa y momentum.
- Control instrumental de la calidad de la materia prima previo al procesamiento y, de los productos terminados después de la producción.
- Evaluación de la calidad por los consumidores por correlación de las mediciones reológicas con las pruebas sensoriales.
- Elucidación de la estructura y composición de los alimentos; análisis de cambios estructurales durante el procesamiento.

La determinación de la reología en la industria de los alimentos no está exenta de problemas y dificultades. Como toda ciencia tiene sus pros y sus contras, el lograr el objetivo de la identificación reológica de un alimento en particular encierra los siguientes problemas (ESCHER, 1983):

- La simulación de las condiciones de procesamiento en los sistemas de medición en los cuales los datos reológicos son aplicados, aumentan la dificultad. Considerando por ejemplo, una gran y moderna lechería con sus grandes distancias de transporte de fluidos usando docenas de válvulas controladas individualmente, con sistemas de tubería con curvas y uniones, intercambiadores de calor, etc., una predicción del esfuerzo de corte que actúa sobre la leche o el yogurt es casi imposible. En tales casos, la evaluación de los sistemas de proceso deben ser reemplazados por una simple medición de esfuerzo de corte-velocidad de deformación a pesar de que los experimentos a gran escala son más caros y consumen mucho tiempo.
- En el uso de los datos reológicos para el diseño de procesos, se debe conocer el rango de exactitud requerido para aquellos datos. Este rango debe variar

dependiendo de la condición actual. Para el diseño de un mezclador, una descripción aproximada de las variables que describen el comportamiento del flujo puede ser probablemente suficiente. Los requerimientos de energía para la mezcla de materiales resistentes deben ser calculados con un margen de seguridad. Por otro lado, la esterilización de los alimentos sensibles al calor se realiza en un nivel mínimo para retener un máximo la calidad determinada por el consumidor. En este caso, el comportamiento del flujo debe ser determinado con mucha precisión, para calcular correctamente los coeficientes de transferencia de calor y por lo tanto, las dimensiones de los intercambiadores de calor y el tiempo de procesamiento.

- La implicación de las propiedades de los flujos en ecuaciones de transferencia de calor, masa y momento, por ejemplo en los alimentos no newtonianos, la relación entre velocidad de deformación y esfuerzo de corte son descritos como modelos matemáticos. Muchas de aquellas aproximaciones, tales como descripciones matemáticas, se encuentran en la literatura; algunos de aquellos modelos están basados en aproximaciones físicas para explicar en términos de estructura y composición el comportamiento de los fluidos, otras son meras aproximaciones matemáticas. En la mayoría de los casos, aquellas ecuaciones de comportamiento de flujo son sólo validas para los rangos de datos experimentales. La aplicación de la ecuación de Casson en la fabricación de chocolate es un ejemplo típico de esta situación. La producción de esfuerzo cortante (*stress*) derivado de la ecuación de Casson puede ser asociada a la calidad de confección, ejemplo en las llamadas *couverture* en las confitería de fabricación continua. Sin embargo, la producción de *stress* de Casson no explica el comportamiento del derretimiento del chocolate en otros procesos como el moldeo de la barra de chocolate; esto es debido al hecho de que el *stress* producido por Casson es un valor extrapolado, y que el *stress* producido y determinado experimentalmente puede desviarse considerablemente.

2.3 Clasificación reológica de los alimentos

Los alimentos, desde los alimentos sólidos, semisólidos hasta los líquidos, los que al ser procesados cambian su comportamiento reológico en cada etapa, se clasifican en la

reología según propiedades físicas, tales como viscosidad, elasticidad o fluidez, los cuales pueden ser descritos con una amplia gama de modelos matemáticos.

Dada la complejidad y la amplitud del tema, los investigadores han hecho una primera clasificación entre los alimentos newtonianos y no newtonianos según su comportamiento reológico, siga o no la ley de Newton de la viscosidad. Existen además alimentos en que el comportamiento reológico depende del tiempo de esfuerzo de corte que se ejerce sobre ellos. Finalmente, existe otros grupos de alimentos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, los llamados fluidos viscoelásticos (HOLDSWORTH, 1971; MÜLLER, 1973; RAO, 1977b; BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 1993). Así, la clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

- Fluidos newtonianos
- Fluidos no newtonianos
 - Independientes del tiempo
 - Plásticos de Bingham
 - Seudoplásticos
 - Dilatantes
 - Dependientes del tiempo
 - Fluidos tixotrópicos
 - Fluidos reopéticos
 - Viscoelásticos.

Para la visualización gráfica del comportamiento reológico de los fluidos, es frecuente la utilización de reogramas, que son gráficos de esfuerzo cortante versus relación de deformación, que tienen una gran utilidad para identificar los diferentes tipos de comportamiento reológico, y que permiten mejorar el desarrollo de muchos productos alimenticios.

2.3.1 Fluidos newtonianos. A este tipo de fluidos se le llama newtoniano en memoria de Sir Isaac Newton, que fue el primero en definir el fluido viscoso, en estos términos: “La resistencia ocasionada por la no deslizabilidad de un líquido es proporcional siempre que los demás factores se mantengan constantes a la velocidad a que se separan las distintas partes del fluido”. Este fluido carece de propiedades elásticas; es incompresible, isotrópico y, como el sólido de Hooke, es ireal. Sin embargo, gran cantidad de líquidos reales muestran un comportamiento newtoniano en un amplio rango de esfuerzos de deformación. Siendo considerados por los reólogos como líquidos newtoniano (MÜLLER, 1973). Así, el comportamiento reológico de los fluidos ideales o newtonianos puede describirse mediante la ley de Newton de la viscosidad, que viene expresada por la ecuación 2-1:

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{ec. 2-1})$$

donde μ es la constante de proporcionalidad entre esfuerzo de corte, σ , versus relación de deformación, $\dot{\gamma}$, denominado coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica. Los fluidos newtonianos por definición poseen una línea recta entre el esfuerzo de corte y la relación de deformación con intercepto cero. Todos los fluidos que no presenten este comportamiento pueden ser llamados no newtoniano; como se observa en el Reograma (FIGURA 1) la pendiente de la recta disminuye con el incremento de la viscosidad.

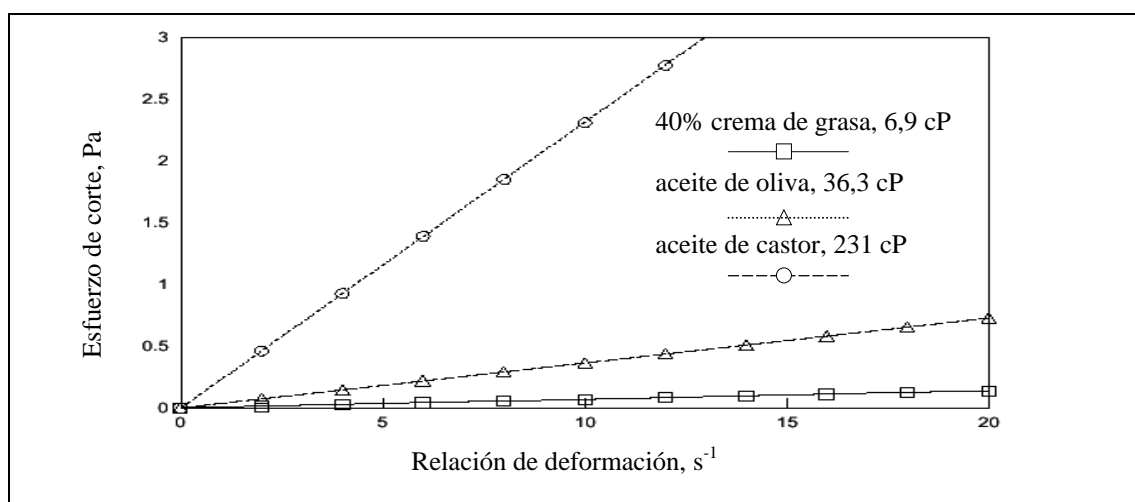


FIGURA 1. Reogramas para fluidos newtonianos típicos

FUENTE: STEFFE (1996)

La composición de este tipo de fluidos carece de estructura y de rigidez mensurable, pero ciertas suspensiones o disoluciones macromoleculares poseen un comportamiento newtoniano si la cadena macromolecular, consta de menos de 1.000 átomos. Influyendo también la concentración; a concentraciones bajas, pueden ofrecer un comportamiento newtoniano incluso las disoluciones macromoleculares. En general, para ofrecer comportamiento newtoniano, las suspensiones macromoleculares deben poseer una estructura discontinua además, las partículas deben comportarse rígidamente y es necesario que no haya interacciones entre ellas o que la interacción sea independiente de la velocidad de flujo (MÜLLER, 1973).

Entre los alimentos de comportamiento newtoniano se encuentra el agua y las disoluciones diluidas de azúcares, te, café, leche (BOURNE, 1982; PERRY y CHILTON, 1982), algunos aceites ligeros de cocina y la leche cruda y homogeneizada (STEFFE *et al.*, 1986) las bebidas carbónicas, los extractos de carne; el jarabe de maíz (RAO, 1975) y ciertas mieles (RAO, 1977a); el huevo y algunos de sus derivados (SCALZO *et al.*, 1970). También se consideran el comportamiento newtoniano de los zumos clarificados y despectinizados de diversas frutas en un rango amplio de temperaturas y concentraciones de sólidos solubles (SARAVACOS, 1970; RAO *et al.*, 1984; SCHWARTZ y COSTELL, 1989; IBARZ *et al.*, 1992; KHALIL *et al.*, 1989).

2.3.2 Fluidos no-newtonianos independientes del tiempo. En este caso no hay proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte; por lo que su viscosidad no permanece constante cuando la temperatura y la composición permanecen invariables, sino que depende del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad, recibiendo, por tanto, el nombre de viscosidad aparente (IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS, 1999). Los fluidos independientes del tiempo se han clasificado en tres categorías o grupos: pseudoplásticos, dilatantes, y plásticos, caracterizándose por que la viscosidad aparente; sólo depende de la temperatura, de la composición del fluido y del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad aplicado, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último.

En FIGURA 2 se describen algunos de los fluidos reológicos más frecuentes, fluidos newtonianos, seudoplásticos, dilatantes y plásticos, cuya viscosidad es estructural y tiene un límite de fluencia.

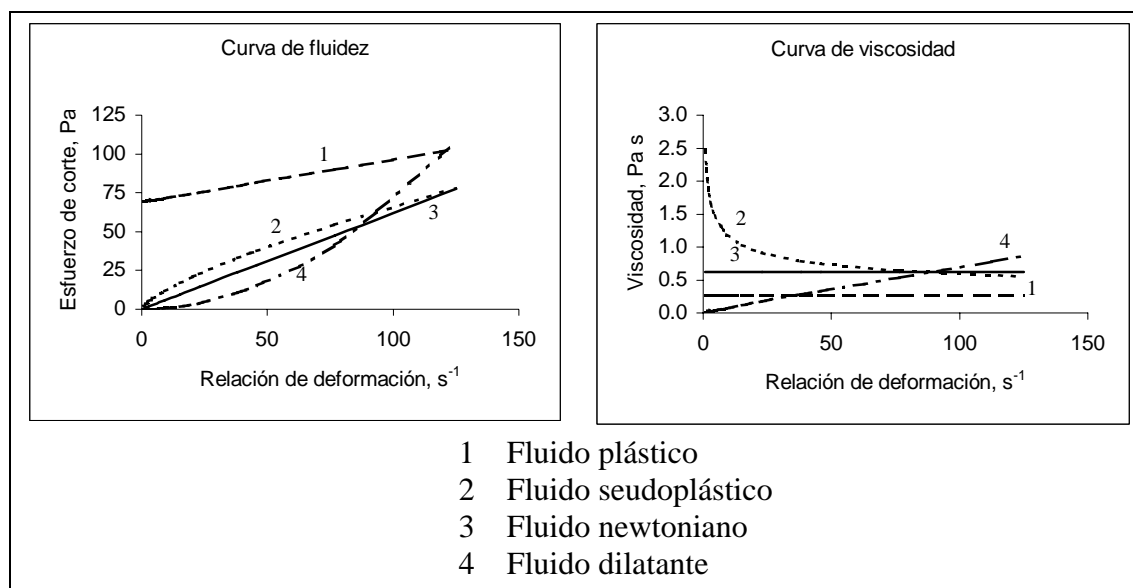


FIGURA 2. Viscosidad aparente de fluidos independientes del tiempo

2.3.2.1 Fluidos seudoplásticos. La viscosidad aparente del fluido seudoplástico disminuye a medida que aumenta la gradiente de velocidad, esto es son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizalla lentamente; este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo, y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular. Uno de los modelos más utilizado para describir este tipo de comportamiento es el de ley de potencia de Ostwald-deWaele

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 2-2})$$

donde K es el índice de consistencia de flujo y n es el índice de comportamiento al flujo. K da una idea de la consistencia del producto y n de la desviación del comportamiento al flujo respecto al newtoniano. Esta ecuación es una de las más utilizadas para describir el flujo de los derivados de fruta que se comportan como seudoplásticos.

Otra relación muy utilizada es la propuesta por HERSCHEL y BULKLEY, cuya expresión supone ampliar la ley de la potencia con un término correspondiente al umbral de fluencia σ_0 (SHERMAN, 1970).

$$\sigma = \sigma_0 + K_H \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 2-3})$$

Dependiendo de los valores que tomen las constantes, esta ecuación puede representar comportamientos newtonianos, plásticos de Bingham, pseudoplásticos o dilatantes.

Otro modelo muy utilizado es el de Casson (SCOTT-BLAIR, 1966), que viene definido por la ecuación:

$$\sigma^{0.5} = K_{oc} + K_c \dot{\gamma}^{0.5} \quad (\text{ec. 2-4})$$

Existen otros modelos, pero los más utilizados en el caso de fluidos alimentarios pseudoplásticos son los anteriormente descritos.

Entre los ejemplos de fluidos pseudoplásticos encontramos, pasta de avellana (ERCAN Y DERVISOGLU, 1998); puré de plátano, salsa vinagreta, jarabe de chocolate, salsa de enchilada y jarabe para panqueque (BRIGGS y STEFFE, 1997); jugo concentrado de frutas o vegetales, compota de manzana, pasta de almidón y proteína (RHA, 1978).

2.3.2.2 Fluidos dilatantes. En este caso la viscosidad aumenta con la tasa de corte, lo inverso al comportamiento pseudoplástico. La dilatancia se explica que a velocidades de deformación bajas las partículas sólidas de tamaños y formas variadas, están unidas y estrechamente empaquetadas y la fracción líquida llena los espacios y lubrica el movimiento, por lo que la viscosidad aparente es baja. Con el aumento de la velocidad de deformación, las partículas largas y flexibles pueden estirarse, rompiéndose el empaquetamiento de los sólidos y la fracción de espacios entre las partículas aumenta. No habiendo suficiente líquido para lubricar el roce de unas partículas contra otras, la viscosidad aparente aumenta. Entonces la dilatancia es evidencia de una formación o reorganización de la estructura de la muestra, dando como resultado un aumento en la resistencia al aplicar una fuerza (RHA, 1978).

Los modelos reológicos que se utilizan para describir este comportamiento son los mismos que los aplicados para describir el comportamiento pseudoplástico, que se ha expuesto en el apartado anterior. Existen pocos alimentos que presentan esta característica, entre ellos tenemos aquellos que forman suspensiones concentradas o pastas acuosas. Algunos ejemplos son ciertos tipos de siropo de eucalipto (PRYCE-JONES, 1953).

2.3.2.3 Fluidos plásticos. Los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo cortante límite determinado, llamado esfuerzo de deformación plástica, umbral de fluencia o límite de fluencia, σ_0 (CHEFTEL et al., 1983). En el caso de los fluidos plásticos de Bingham, una vez que se supera el valor del umbral de fluencia, la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo de corte, como en el caso de los fluidos newtonianos (WAZER *et al.*, 1963). Estos fluidos exhiben propiedades de líquido a esfuerzos superiores al umbral de fluencia, por lo tanto, pueden ser clasificados tanto como líquidos o como sólidos.

El producto plástico ideal es el descrito por el modelo de Bingham:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta' \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 2-5})$$

donde σ_0 es el umbral de fluencia y η' es la viscosidad plástica.

Según RHA (1978), el umbral de fluencia puede ser consecuencia de un entrelazado de moléculas o partículas debido a su gran tamaño, ramificaciones o forma irregular. También puede ser debida a la formación de redes provocadas por las interacciones entre moléculas o entre los alimentos típicamente plásticos. Entre estos se encuentran el puré de patata y la nata batida, el chocolate fundido y algunas grasas como margarinas y mantequillas (MÜLLER, 1973). El modelo de Bingham ha sido también utilizado por algunos autores para describir el comportamiento reológico de pastas de fécula de mandioca (ODIGBOH y MOHSENIN, 1975b), suero de puré de albaricoque a gradientes de deformación bajos (COSTELL *et al.*, 1982), de geles de pectina

(FISZMAN *et al.*, 1984) y de algunos zumos naturales de manzana (IBARZ y CASERO, 1987).

2.3.3 Fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo. La viscosidad aparente varía no sólo con el esfuerzo de corte, sino que también para un esfuerzo de corte constante, varía con el tiempo de duración de la relación de deformación; clasificándose en fluidos tixotrópicos y reopécticos. Para los primeros, a una velocidad de deformación fija, la viscosidad disminuye con el tiempo de cizallado; para los últimos, la viscosidad aumenta con el tiempo (RAO, 1977 b; BARBOSA-CÁNOVAS, *et al.*, 1993).

2.3.3.1 Fluidos tixotrópicos. Su viscosidad aparente y el esfuerzo de corte disminuyen con el tiempo al mantener una velocidad de deformación constante, debido al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura, dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo (RHA, 1978). Se han utilizado distintos modelos matemáticos para cuantificar la dependencia del tiempo de la viscosidad de los alimentos. A continuación se describen los más importantes.

- Modelo de WELTMANN (1943):

$$\sigma = \sigma_0 - \log t \quad (\text{ec. 2-6a})$$

Este modelo relaciona la viscosidad plástica con el tiempo de aplicación de un determinado gradiente de velocidad a través del coeficiente temporal de ruptura tixotrópica (B), el cual representa, en cierta manera, la cantidad de estructura que se degrada durante el cizallamiento. El parámetro σ_0 indica la tensión tangencial necesaria para que comience a degradarse la estructura que origina la tixotropía.

Una modificación de esta ecuación ha sido utilizado por varios autores para analizar la dependencia del tiempo al flujo de varios alimentos, como la clara de huevo (TUNG *et al.*, 1970), el zumo de tomate (JIMÉNEZ *et al.*, 1988), los aderezos de ensalada (PAREDES *et al.*, 1988) y el puré de albaricoque (COSTELL y DURAN, 1978), como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\sigma = \sigma_0 - B \ln t \quad (\text{ec.2-6b})$$

- Modelo de HAHN *et al.* (1959)

$$\log (\sigma - \sigma_e) = \sigma_0 - B_I t \quad (\text{ec. 2-7})$$

donde σ_0 , al igual que en el modelo de Weltmann, indica el esfuerzo cortante inicial necesario para que comience a degradarse la estructura que da lugar a la tixotropía. El valor de B_I informa sobre la velocidad del proceso de degradación de la estructura y depende de la resistencia estructural del fluido frente al cizallamiento que se aplica. σ es el esfuerzo cortante y σ_e es el esfuerzo cortante de equilibrio.

- Modelo de TIU y BOGER (1974):

$$\sigma = k (\sigma_0 + K_H \dot{\gamma}^n) \quad (\text{ec. 2-8})$$

Este modelo permite caracterizar de forma completa el comportamiento reológico de materiales cuyo comportamiento se podría definir como plástico, pseudoplástico y dependiente del tiempo (CARBONELL *et al.*, 1990). Este modelo asume que el parámetro estructural k varía con el tiempo según una ecuación cinética de segundo orden, válida para $k > k_e$:

$$\frac{dk}{dt} = K_t (k - k_e)^2 \quad (\text{ec. 2-9})$$

en la que la constante K_t es una constante de velocidad que es función de la velocidad de deformación y debe ser determinada experimentalmente.

El comportamiento tixotrópico ha sido encontrado en varios alimentos. Además de la clara de huevo, el zumo de tomate, los aderezos de ensalada y el puré de albaricoque, citados anteriormente, también se ha observado este comportamiento en leche condensada, mayonesa (XU *et al.*, 1984; STEFFE *et al.*, 1986; GALLEGOS *et al.*, 1988), algunos quesos blandos (MASSAGUER-ROIG *et al.*, 1984) y miel. Entre otras investigaciones realizadas en alimentos cabe, también, destacar las que llevaron a cabo KOKINI y DICKIE (1981), quienes observaron dependencia con el tiempo cuando

estudiaron el comportamiento reológico de muestras de mayonesa, mantequilla, margarina, puré de manzana, ketchup y mostaza.

2.3.3.2 Fluidos reopécticos. La viscosidad aparente aumenta con el tiempo, cuando se somete el alimento a un determinado gradiente de velocidad, mostrando un comportamiento al flujo contrario a los tixotrópicos. El modelo reológico aplicable generalmente a estos fluidos es el de la ley de la potencia modificado para tomar en consideración la dependencia del tiempo. También se pueden usar otros modelos con mayor o menor éxito. De forma general se puede utilizar un modelo que cumple la variación del esfuerzo de corte en función del tiempo:

$$\frac{d\sigma}{dt} = K(\sigma_e - \sigma)^n \quad (\text{ec. 2-10})$$

Finalmente indicar que, aunque se ha observado un comportamiento reopéctico en algunos alimentos como ciertos siropos de eucalipto, este tipo de fluidos son muy poco frecuentes en el campo de la alimentación.

2.3.4 Fluidos no newtonianos viscoelásticos. Las características de los productos viscoelásticos varían desde las de los líquidos viscosos con propiedades elásticas (modelo de Maxwell) a las de los sólidos con propiedades viscosas (modelo de Kelvin-Voigt). En condiciones normales, no es apreciable la elasticidad debida al estiramiento de los enlaces interatómicos y se puede afirmar que la elasticidad de los alimentos viscoelásticos es debida a la deformación elástica de las macromoléculas. En los alimentos viscoelásticos es frecuente que sólo se dé una recuperación parcial, porque la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión. Cuanto mas completa y resistente sea esta red, tanto más acusada será la elasticidad; cuanto más fácilmente se desintegre la red, mayor será el componente viscoso (MÜLLER, 1973).

El modelos matemáticos más simple que caracteriza este comportamiento es una combinación un sólido de Hooke con un fluido de Newton, lo que lleva al conocido modelo de Maxwell

$$\sigma + \lambda \dot{\sigma} = \eta \dot{\gamma} \quad (\text{ec.2-11})$$

donde λ es el tiempo de relajación definido como la relación entre la viscosidad newtoniana (η) y el módulo de elasticidad (G). Este modelo tiene el defecto de ser demasiado restringido, ya que solamente puede ser aplicado cuando el comportamiento viscoelástico es lineal y, por lo tanto, no es adecuado cuando lo que se pretende representar es un comportamiento no lineal como el observado en los materiales reales. Es por esto, que son necesarias expresiones más complicadas que modelicen de forma más apropiada los comportamientos viscoelásticos no lineales (KOKINI, 1992). El modelo de Bird-Carreau es uno de ellos, y está basado en la teoría constitutiva de Carreau que incorpora la historia completa de deformación del material.

Existen varios alimentos que presentan propiedades viscoelásticas. Se trata, en general, de productos con características de geles o semisólidos como los geles de almidón-gelatina y los de leche, los helados, las manzanas, los fideos cocidos, el queso, la masa de harina de trigo, las espumas de proteína y los granos de maíz y trigo (MÜLLER, 1973). También presentan propiedades viscoelásticas la crema de leche y la mantequilla batida (RAO, 1986).

2.4 Constantes reológicas fundamentales

Los líquidos no newtonianos consideran, como mínimo, dos parámetros de viscosidad; éstos son los índices reológicos de consistencia K y de comportamiento n (BARNES, 2001).

- Coeficiente de consistencia, K . Es una constante de proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte aplicado que la produce; es un indicador del grado de viscosidad en fluidos no newtonianos. Tiene la unidad de Pa s^n .
- Índice de comportamiento reológico, n . Es un número adimensional que indica la cercanía al flujo newtoniano. Para un líquido newtoniano n es 1; para un fluido dilatante n es mayor que 1; y para un fluido seudoplástico n es menor que 1.

En el CUADRO 1 se presenta distintos ejemplos de alimentos fluidos y semifluidos y se observa como cambian las constantes para cada tipo de flujo.

CUADRO 1. Constantes fundamentales para diferentes tipos de fluidos

Tipo de flujo	Índice de consistencia	Índice de comportamiento al flujo	Umbral de fluencia	Ejemplo
Newtoniano	Viscosidad $K > 0$	$n = 1$	$\sigma_0 = 0$	Jugos clarificados, aceites, leche, jarabes de pastelería.
Seudoplástico	Viscosidad aparente $K > 0$	$0 < n < 1$	$\sigma_0 = 0$	Jugos concentrados cremogenados y purés, de fruta, almidón.
Plástico de Bingham	Plasticidad constante $K > 0$	$n = 1$	$\sigma_0 > 0$	Aderezos de ensalada, salsa de dulce de chocolate, ketchup.
Tipo mixto	Índice de consistencia $K > 0$	$0 < n < 1$	$\sigma_0 > 0$	Mermelada, jalea.
Dilatante	Índice de consistencia $K > 0$	$1 < n < 4$	$\sigma_0 = 0$	Mantequilla de maní, pasta de salchichas.

FUENTE: RHA (1978)

2.5 Modelo predictivo de la viscosidad aparente en función de la temperatura y relación de deformación.

En el caso de fluidos que obedecen el modelo de la ley de la potencia y de Herschel-Bulkley, el efecto de la temperatura puede correlacionarse mediante un modelo combinado de la ecuación de Arrhenius para el índice de consistencia (HARPER y EL-SAHRIGI, 1965; VITALI y RAO, 1984):

$$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = K_T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdot \dot{\gamma}^{\bar{n}-1} \quad (\text{ec. 2-12})$$

donde:

\bar{n} promedio del índice de comportamiento de flujo basado en todas las temperaturas

K_T constante dependiente de la temperatura (Pa s^n)

E_a energía de activación (J/mol)

T temperatura (K)

R constante universal de los gases (8,314 J/mol K)

Esta ecuación ha sido utilizada en concentrados de tomate (HARPER y EL-SHRIGI, 1965; RAO *et al.*, 1981), cremogenado de pera (HARPER y LEBERMANN, 1962), puré de guayaba (VITALI y RAO, 1982) y concentrados de frambuesa (IBARZ y PAGÁN, 1987b). En líneas generales puede decirse que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, y lo mismo ocurre con el índice de consistencia y el umbral de fluencia IBARZ *et al.*, (1995).

2.6 Determinación de las constantes reológicas en la práctica

MITSCHKA (1982) desarrolló una técnica simple para calcular el esfuerzo cortante y la relación de deformación promedio a partir de datos obtenidos con viscosímetros de tipo *Brookfield* RVT. Esto permite la estimación de la viscosidad aparente, del índice de comportamiento de flujo, y del coeficiente de consistencia de fluidos que obedecen a la ley de potencia. Las aplicaciones reométricas de estos estudios se apoyan en algunas reglas empíricas, las cuales hacen posible obtener resultados concretos para sistemas axisimétricos reales del tipo “husillo rotatorio-contenedor de muestra”.

2.7 Los fluidos pseudoplásticos en la industria

Prácticamente la totalidad de los fluidos utilizados en plantas industriales corresponden a fluidos no newtonianos, los cuales son tratados o calculados según leyes para flujos newtonianos (velocidad proporcional al esfuerzo de corte). Se ha mostrado en estudios previos, el error que se comete al tratar como newtonianos los fluidos dilatantes o pseudoplásticos. De aquí la importancia del desarrollo de herramientas para el estudio de

estos fluidos. La dependencia con respecto a la velocidad de deformación pone de manifiesto la existencia de una estructura dentro del sistema. El comportamiento pseudoplástico indica una ruptura continua o reorganización de la estructura, dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo. Se debe a la presencia de (RHA, 1978):

- Compuestos de elevado peso molecular o partículas alargadas a concentraciones bajas
- Alta interacción entre partículas, causando su agregación o asociación por enlaces secundarios
- Relación axial elevada y asimetría de las partículas, requiriendo su orientación a lo largo de las líneas de corriente
- Variación de la forma y tamaño de las partículas, permitiendo su apilamiento
- Partículas no rígidas o flexibles, que pueden sufrir un cambio en su geometría o conformación.

IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999) citan algunos investigadores que han trabajado sobre el comportamiento pseudoplástico de algunos alimentos: SARAVACOS (1970) trabajó con manzana, uva, y zumo comercial de naranja; PRENTICE (1968) con nata; CORNFORD *et al.* (1969) con muestras derretidas de huevos enteros congelados; TUNG *et al.* (1970) con clara de huevo no mezclada. HARPER y EL SAHRIGI (1965) estudiaron el comportamiento reológico de concentrados de tomate en el intervalo de sólidos totales comprendido entre 5,8 a 30,0 % p/p. El modelo de la potencia describe adecuadamente el comportamiento al flujo de estos concentrados (IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS, 1999). WATSON (1968) usó el modelo de la potencia para caracterizar el comportamiento reológico de purés y concentrados de albaricoques verdes y maduros. Las propiedades reológicas de ciertos números de otros purés de frutas han sido determinados, y en cada caso el modelo de la potencia ha sido utilizado para describir el comportamiento de flujo. Algunos productos estudiados son: salsa de manzana (CHARM, 1960; SARAVACOS, 1968), y puré de pera (HARPER Y

LEBERMAN, 1962; SARAVACOS, 1968; RAO *et al.*, 1975). Se encontró que el ketchup de tomate y la mostaza francesa obedecen a la ley de la potencia con un umbral de fluencia (HIGGS y NORRINGTON, 1971).

2.8 Conducción de fluidos pseudoplásticos por tuberías

2.8.1 Número de Reynolds. En la circulación de fluidos incompresibles por conducciones debe tenerse presente el tipo de flujo. Bajo esta consideración, los fluidos pueden circular en régimen laminar o turbulento, dependiendo del valor del número de Reynolds, Re (COULSON y RICHARDSON, 1979; McCABE *et al.*, 1991), el cual es adimensional y se define como:

$$Re = \frac{vd\rho}{\eta} \quad (\text{ec. 2-13})$$

donde :

- v velocidad media que lleva el fluido en la tubería, m / s
- d diámetro interno de la tubería, m
- ρ densidad del fluido, kg /m³
- η viscosidad, kg / s m

Este módulo es una medida de la razón entre las fuerzas de inercia y las viscosas o de rozamiento en cada punto de un fluido en movimiento. A continuación se dan los tipos de régimen de circulación según el valor de número de Reynolds:

CUADRO 2. Tipo de régimen de circulación según el número de Reynolds

$Re < 2100$	Régimen laminar
$2100 < Re < 4000$	Régimen de transición
$4000 < Re < 10000$	Régimen prácticamente turbulento
$10000 < Re$	Régimen turbulento

FUENTE: IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999)

En la ecuación 2-13 se ha definido el número de Reynolds para fluidos newtonianos; sin embargo, si el fluido es no newtoniano, este número se define de manera diferente (CHARM, 1971; RAO, 1992; LEVENSPIEL, 1993; SINGH y HELDMAN, 1993). Así, para fluido de la ley de la potencia se tienen la siguiente ecuación (ec. 2-14) para el número de Reynolds modificado o generalizado, Re_G :

$$Re_G = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{g^{n-1} K} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \quad (\text{ec. 2 -14})$$

Para fluidos newtonianos se considera que un fluido circula en régimen laminar, si el valor del número de Reynolds es inferior a 2100. Sin embargo, si los fluidos son no newtonianos el criterio a seguir es distinto. Se define el valor crítico del número de Reynolds como el valor del mismo a partir del cual el fluido deja de circular en régimen laminar. Para fluidos de la ley de la potencia el valor crítico del número de Reynolds (STEFFE y MORGAN, 1986) está dado por la ecuación 2-15:

$$Re_G)_{\text{Crítico}} = \frac{6464n}{(1+3n)^2 \left(\frac{1}{2+n} \right)^{(2+n)/(1+n)}} \quad (\text{ec.2 -15})$$

Una representación grafica de esta ecuación se muestra en la FIGURA 3. El valor crítico del número de Reynolds presenta un máximo de 2400 para un valor del índice de flujo de 0,4. A partir de aquí su valor va disminuyendo hasta 2100, que es el valor correspondiente a un fluido newtoniano ($n = 1$).

También es posible determinar el caudal volumétrico y la velocidad media para el fluido de la ley de potencia (DODGE y METZNER, 1959; SKELLAND, 1967; HELDMAN, 1975, TOLEDO, 1993).

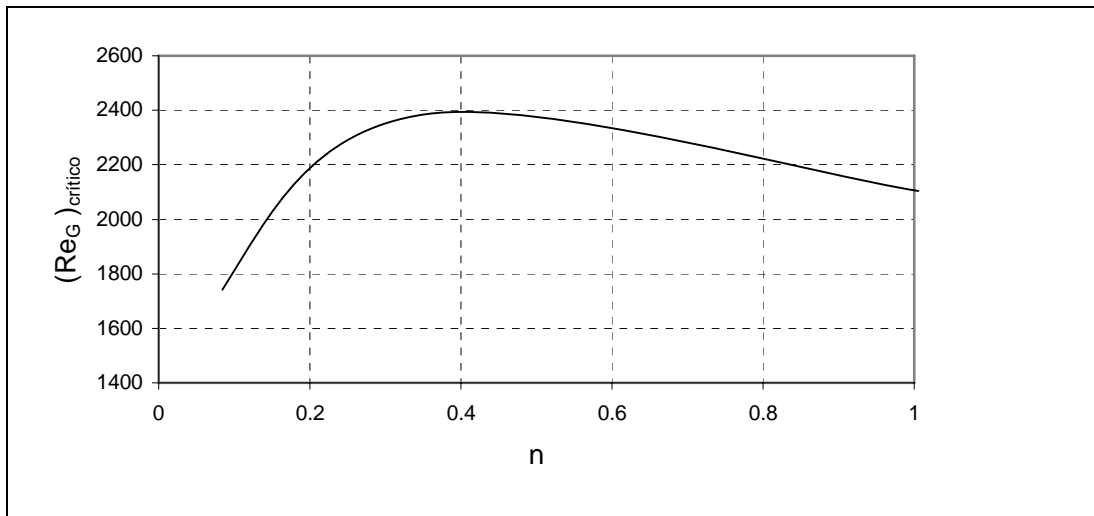


FIGURA 3. Variación del número de Reynolds crítico con el índice de flujo, para fluidos de la ley de potencia

FUENTE: IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999)

2.8.2 Distribución de velocidades para un fluido de la ley de potencia. El problema fundamental que se presenta al estudiar el flujo de fluidos por el interior de tuberías es conocer y encontrar las ecuaciones que relacionen la pérdida de presión, que experimenta el fluido dentro de la tubería, con el flujo y con las diferentes propiedades del fluido, así como con las características y dimensiones de la tubería. Una vez conocidas estas relaciones, mediante los balances de materia y energía, es posible calcular la potencia necesaria para el transporte del fluido alimentario considerado a través de la tubería.

En este estudio debe conocerse inicialmente de qué tipo de fluido se trata, para lo cual debe realizarse una clasificación de ellos, según el comportamiento que presentan bajo la acción de presiones externas. Los fluidos pueden ser: compresibles e incompresibles. En el caso de fluidos incompresibles debe tenerse presente el tipo de flujo. Los que pueden circular en régimen laminar o turbulento, dependiendo del número de Reynolds (COULSON y RICHARDSON, 1979; McCABE *et al.*, 1991)

2.8.2.1 Régimen laminar. El perfil de velocidad en régimen laminar para una sección transversal circular de una tubería, es la representación gráfica que resulta de la variación de la velocidad puntual del fluido con respecto al radio de la tubería representándose según la ecuación 2-16

$$v = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{1/n} \left[R^{n+1/n} - r^{n+1/n} \right] \quad (\text{ec. 2-16})$$

donde:

ΔP la diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la tubería, kg/ s² m

L la longitud de la tubería, m

R el radio interior de la tubería, m

r el radio de la tubería en cualquier posición, m

K índice de consistencia, kg / m s

n índice de comportamiento reológico

Además es posible determinar el caudal volumétrico y la velocidad media para el fluido de la ley de potencia .

a) Caudal volumétrico. El caudal volumétrico corresponde a la cantidad de volumen de fluido que pasa a través de una sección transversal de la tubería en un tiempo determinado.

$$\dot{Q} = \pi R^3 \left(\frac{n}{3n+1} \right) \left(\frac{\sigma_w}{K} \right)^{1/n} \quad (\text{ec. 2-17})$$

donde:

σ_w el esfuerzo cortante que el fluido ejerce sobre la pared de la conducción por la cual está fluyendo, Pa

\dot{Q} caudal volumétrico, m³ / s

b) Velocidad media. La velocidad media se calcula a partir del flujo o caudal volumétrico, dividiendo la ecuación correspondiente por el área de flujo:

$$v_m = \frac{q}{\pi R^2} \quad (\text{ec. 2-18})$$

Entonces la relación entre la velocidad puntual y media está dada por la ecuación 2-19.

$$\frac{v}{v_m} = \frac{3n+1}{n+1} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (\text{ec. 2-19})$$

En la FIGURA 4 se puede observar la variación del perfil de velocidades adimensional (v/v_m) en función del radio adimensional (r/R) para este tipo de fluido, perfil que depende del valor que adquiere el índice de flujo. Para $n = 1$ en el que el fluido es newtoniano, el perfil resultante es parabólico (IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS ,1999). El valor de la velocidad máxima se presenta en el centro de la tubería, y puede ser calculado por:

$$\frac{v_{\text{máx}}}{v_m} = \frac{3n+1}{n+1} \quad (\text{ec. 2-20})$$

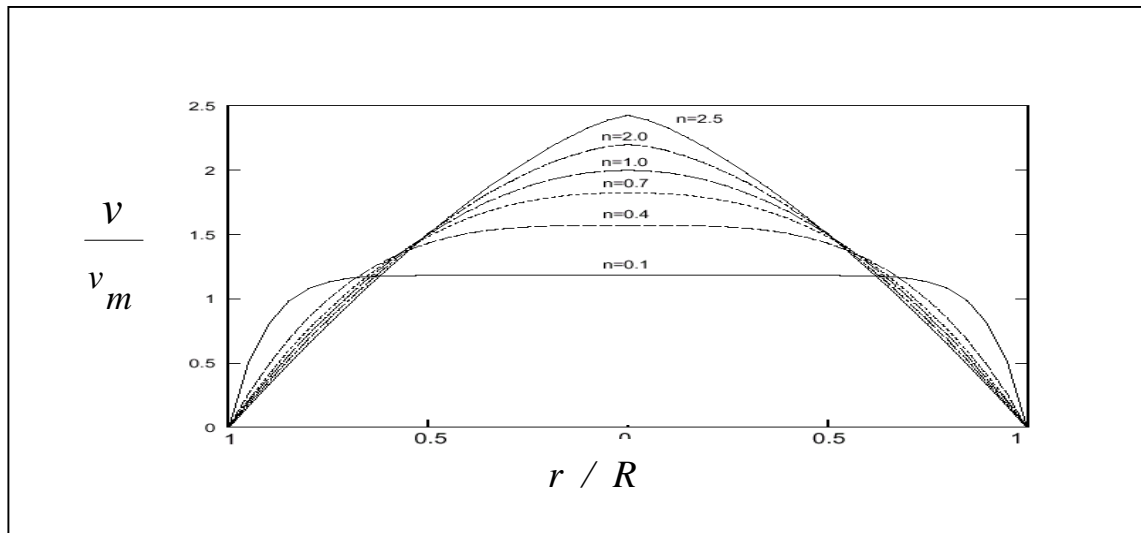


FIGURA 4. Perfil de velocidades para fluidos de la ley de potencia, en función del índice de flujo

FUENTE: IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999)

2.8.2.2 Régimen turbulento. En régimen turbulento pueden distinguirse tres zonas en la vena líquida. Una capa laminar que está en contacto con la pared de la tubería debido a los esfuerzos cortantes, un zona de turbulencia que predomina en el centro de la tubería, formándose un frente completamente plano y entre estas dos zonas una de transición, como se aprecia en la FIGURA 5.

En régimen turbulento no se ha deducido una ecuación teórica que proporcione el perfil de velocidades, pero experimentalmente se puede llegar a una ecuación que describe satisfactoriamente dicho perfil. Así la ecuación a utilizarse sería:

$$v_m = v_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (\text{ec. 2-21})$$

en donde c es una constante que depende del valor del número de Reynolds, presentando los siguientes valores (STEFFE, 1996):

$$c = 6 \quad \text{para} \quad \text{Re} = 4 \times 10^3$$

$$c = 7 \quad \text{para} \quad \text{Re} = 1 \times 10^5$$

$$c = 10 \quad \text{para} \quad \text{Re} = 3 \times 10^6$$

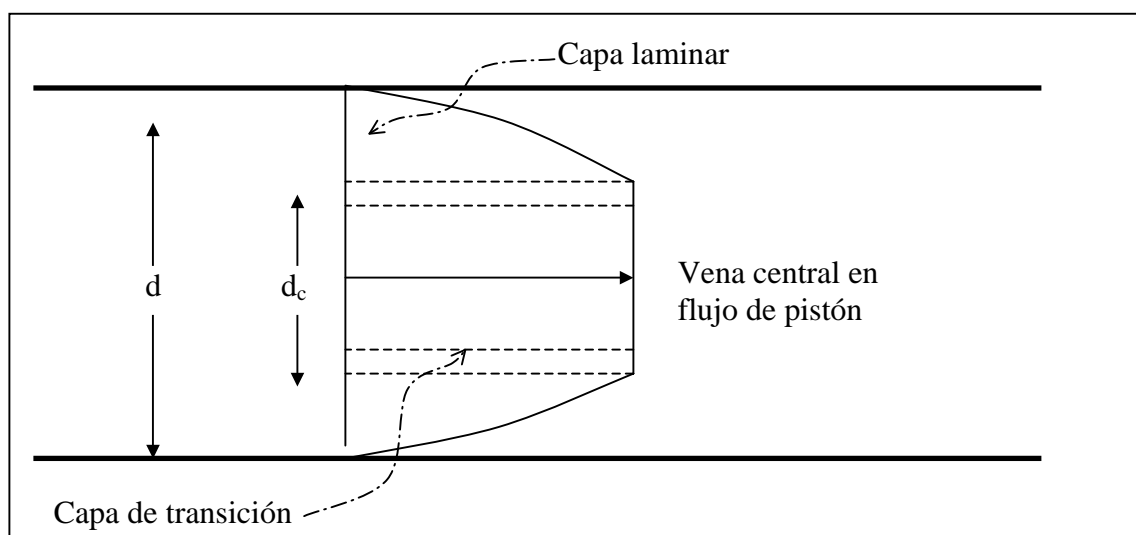


FIGURA 5. Perfil de velocidades en régimen turbulento

FUENTE: IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999)

La velocidad media puede calcularse de manera análoga que para régimen laminar, generándose la siguiente expresión:

$$v_m = v_{m\acute{a}x} \frac{2c^2}{(1+c)(1+2c)} \quad (\text{ec. 2-22})$$

Esta ecuación se aproxima bien a los resultados experimentales, ya que al representar $v_m/v_{m\acute{a}x}$ frente al número de Reynolds se obtiene una curva que se ajusta a esta ecuación representada en la FIGURA 6 (IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS, 1999).

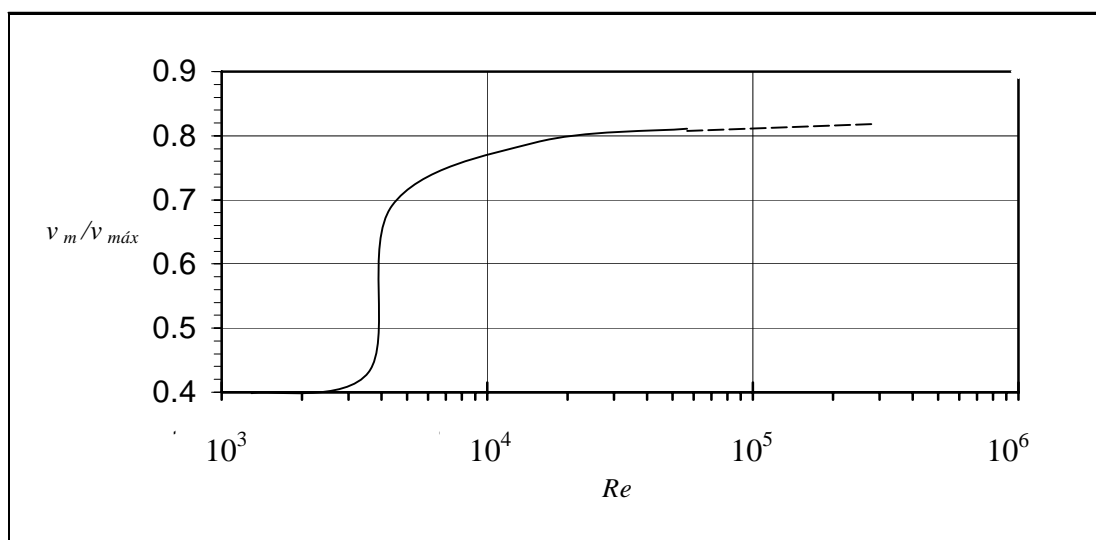


FIGURA 6. Variación de $(v_m/v_{m\acute{a}x})$ con el número de Reynolds para régimen turbulento

FUENTE: IBARZ y BARBOSA-CÁNOVAS (1999)

Para fluidos de la ley de potencia, que son transportados a través de tubos lisos, la relación $v_m/v_{m\acute{a}x}$ es función del número de Reynolds generalizado y del índice de flujo, (DODGE y METZNER, 1959).

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Lugar de la investigación. El trabajo experimental se llevo a cabo en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICYTAL) de la Universidad Austral de Chile, Valdivia.

3.2 Materia prima. La materia prima utilizada fue murta (*Ugni molinae* Turcz) adquirida en el mercado fluvial de Valdivia, procedente del sector costero de Punucapa, camino a Curiñanco.

3.3 Equipos

- Balanza digital PRECISA 6200 D SCS (Precisión: ± 0.1)
- Viscosímetro Visco Star R de Fungilab S.A.
- Sistema de circulación de agua por inmersión HAAKE modelo DC3
- Despulpadora Lab 18 pulpero-refinador de Dixie Canner Equipment
- Procesador de alimento
- Cámara de congelación (-25° C)

3.4 Metodología

La metodología involucra la preparación de diferentes pasta de murta, la descripción del análisis reológico, y el cálculo de las constantes reológicas fundamentales.

3.4.1 Preparación de las muestras. Las muestras se prepararon utilizando murta fresca y congelada a las cuales se les sometió a un escaldado, molienda y un despulpado para luego agregarles azúcar al 15% tal como se describe la FIGURA 7 y 8, obteniendo así las diferentes preparaciones de pasta de murta.

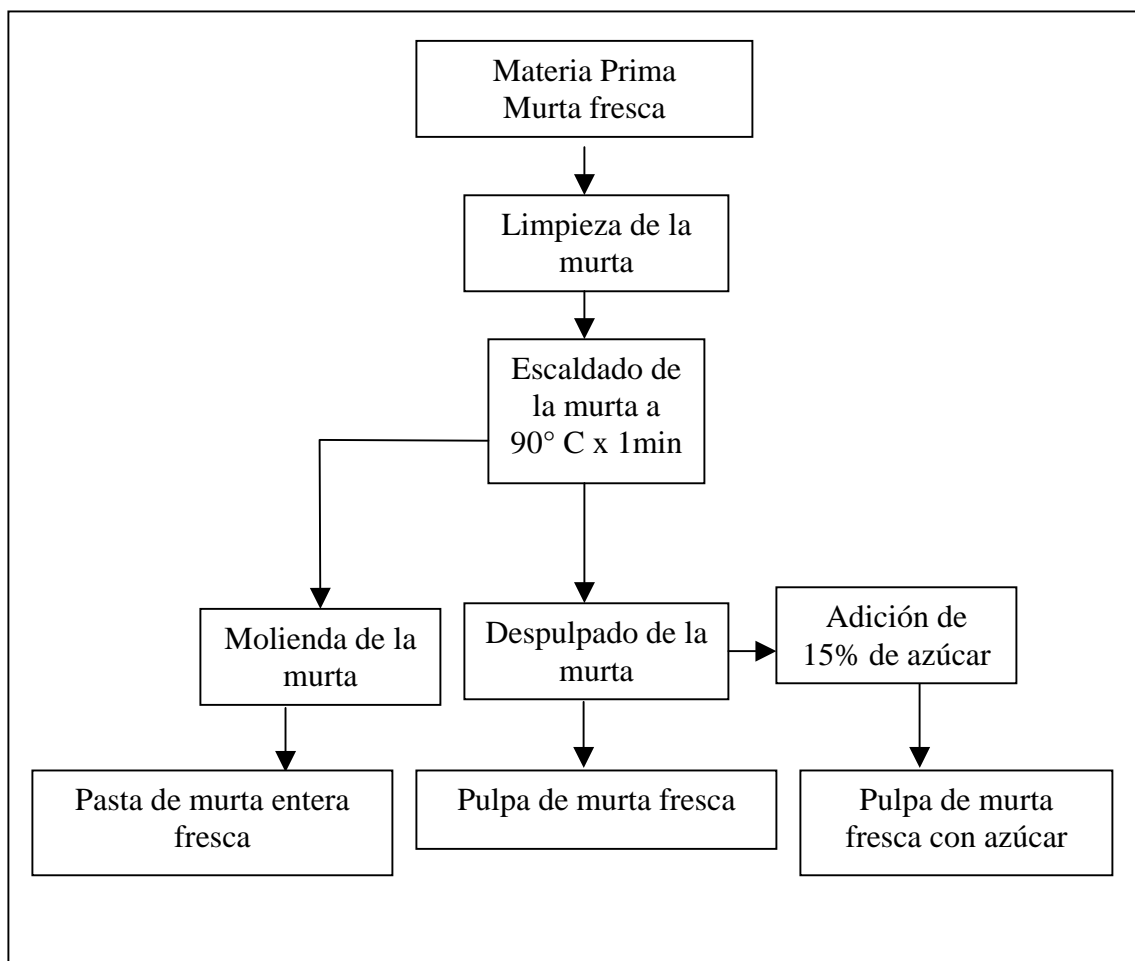


FIGURA 7. Línea de flujo de la preparación de las muestras de murta fresca

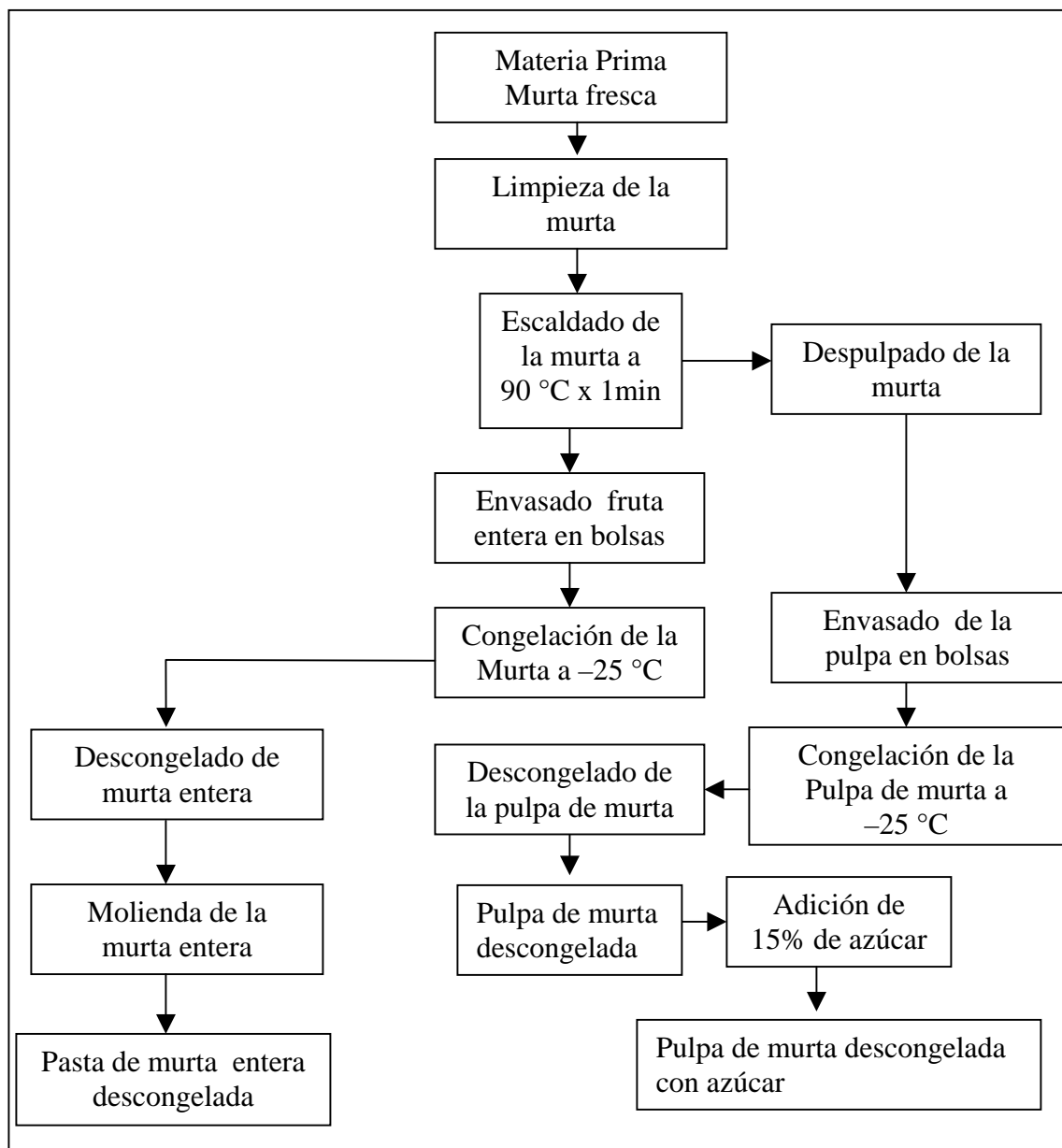


FIGURA 8. Línea de flujo de la preparación de las muestras de murta descongelada

- **Descongelado de la murta:** se realizó sumergiendo la murta envasada en bolsa en agua fría circulante por el espacio de 1 hora
- **Escaldado de la murta:** la murta se sometió a un escaldado en agua destilada a 90 °C por 1 minuto para la inactivación enzimática

- **Molienda de la murta:** se realizó utilizando un procesador de alimento, hasta que la pasta adquirió homogeneidad, alrededor de 10 minutos
- **Despulpado de la murta:** el despulpado de la murta se realizó en una despulpadora semi-industrial con un tamiz de 0,5 mm
- **Adición de azúcar:** a la pulpa de murta se le adiciono azúcar y se mezcló en forma manual por 20 minutos, hasta lograr una pasta homogénea de ambos componentes

3.4.2 Descripción del análisis reológico. Para el análisis de las muestras se utilizó el viscosímetro Visco Star R y un sistema de circulación de agua por inmersión HAAKE. A continuación se especifica la preparación del equipo y la forma de toma de los datos:

- Se estabilizó la temperatura en el sistema de circulación de agua, para las diferentes temperaturas de análisis que son: 30, 45, 60, 75, 90 °C
- Se llenó el cilindro contenedor de muestra con la pasta de murta hasta la marca de indicación que éste posee (equivalente a 125 g de muestra) y controlar la temperatura en el centro del cilindro con una termocupla hasta que se alcance la temperatura de análisis. Se eligió un tiempo de 15 min para asegurar condiciones constantes de temperatura
- Se introdujo el husillo R6 de manera lateral, para evitar la formación de burbujas, y luego se lo a línea al centro de la muestra
- Se tapó el cilindro y se hace girar el husillo R6, a diferentes velocidades de rotación (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 10; 12; 20; 30; 50; 60; 100; 200 rpm) para la toma de lectura
- Se realizó la toma de lectura de viscosidad newtoniana equivalente (VNE) a las diferentes velocidades de rotación cada 10 minutos.

Para cada temperatura de análisis se procede de la misma forma cambiando sólo el contenido del cilindro contenedor de muestra.

3.4.3 Cálculo de las constantes reológicas. Para la determinación de las propiedades reológicas se utiliza el método de conversión de MITSCHKA (1982) para obtener las funciones de viscosidad: esfuerzo de corte-relación de deformación, con una precisión suficiente para las aplicaciones de ingeniería.

CUADRO 3. Ecuaciones para encontrar el factor de conversión para la transformación de la VNE en función de la velocidad de rotación

Número de husillo	Ecuación de potencia	Coefficiente de determinación r^2
1	$FC = 100 N_i^{-1}$	1,00
2	$FC = 400 N_i^{-1}$	1,00
3	$FC = 1000 N_i^{-1}$	1,00
4	$FC = 2000 N_i^{-1}$	1,00
5	$FC = 4000 N_i^{-1}$	1,00
6	$FC = 10000 N_i^{-1}$	1,00
7	$FC = 40000 N_i^{-1}$	1,00

FUENTE: Brookfield Engineering Laboratories, Inc.

El cálculo de las constantes comienza con la transformación de los valores de viscosidad newtoniana equivalente (VNE) en cP o en Pa·s obtenidos por el instrumento de medición (Viscosímetro Visco Star R) en números porcentuales de escala de torque (α), mediante la fórmula correspondiente que utiliza el factor de conversión (FC) del CUADRO 3 para el husillo especificado a cada número de revoluciones, N en rpm.

Por lo cual se puede obtener el valor porcentual para cada lectura con la fórmula siguiente:

$$\alpha_i = \frac{\text{VNE}}{\text{FC}} \quad (\text{ec. 3-1})$$

Para la conversión de los valores α en esfuerzo de corte, σ , en Pa, se utiliza el factor de conversión $K_{\alpha\sigma}$ del CUADRO 4, correspondiente al husillo respectivo utilizado.

CUADRO 4. Factores de conversión para los husillos del viscosímetro R.V.T. Brookfield o equivalente bajo condiciones estándares de medición

Número de husillo		1	2	3	4	5	6	7	
	$K_{\alpha\sigma}$	0,035	0,119	0,279	0,539	1,05	2,35	8,4	
n	0,1	1,728	1,431	1,457	1,492	1,544	1,366	1,936	
	0,2	0,967	0,875	0,882	0,892	0,907	0,851	1,007	
	0,3	0,705	0,656	0,656	0,658	0,663	0,629	0,681	
	0,4	0,576	0,535	0,53	0,529	0,528	0,503	0,515	
	0,5	$K_{N\gamma}$	0,499	0,458	0,449	0,445	0,442	0,421	0,413
	0,6		0,449	0,404	0,392	0,387	0,382	0,363	0,346
	0,7		0,414	0,365	0,35	0,343	0,338	0,32	0,297
	0,8		0,387	0,334	0,317	0,31	0,304	0,286	0,261
	0,9		0,367	0,31	0,291	0,283	0,276	0,26	0,232
	1		0,351	0,291	0,27	0,262	0,254	0,238	0,209

FUENTE: MITSCHKA (1982)

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot K_{\alpha\sigma} \quad (\text{ec. 3-2})$$

Con los datos obtenidos se grafican el $\log \sigma_i$ versus $\log N_i$. Si la dependencia es cercana a la línea polinomial con un índice de determinación (R^2) cercano a 1, entonces el fluido es del tipo ley de potencia. La ecuación polinomial obtenida es derivada para poder obtener el índice de comportamiento aparente, n^* . Éste es reemplazado en la ecuación 3-3 para obtener la relación de deformación, $\dot{\gamma}$, s^{-1} .

$$\dot{\gamma}_i = K_{N\gamma} \cdot N_i \quad (\text{ec. 3-3})$$

$$\dot{\gamma}_i = 0.2436(n^*)^{-0.766} \cdot N_i \quad (\text{ec. 3-4})$$

Finalmente el cálculo de la viscosidad aparente para cada lectura se obtiene al dividir el esfuerzo de corte por la relación de deformación.

$$\eta = \frac{\sigma_i}{\dot{\gamma}_i} \quad (\text{ec. 3-5})$$

Al graficar los vectores σ versus $\dot{\gamma}$ y ajustar los puntos mediante una ecuación de potencia se obtiene la ecuación descriptiva típica de un fluido pseudoplástico, donde la pendiente de la curva es el coeficiente de consistencia (K).

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 3-6})$$

3.5 Diseño Experimental.

Las variables independientes son la materia prima, el tipo de preparación de la pasta y la temperatura. Se tienen

- Materia prima en estado fresco y descongelado
- Pasta de murta entera, pasta de despulpado de murta mezclada con 15% de azúcar y otra pasta de despulpado de murta sin azúcar
- Temperatura

Las variables dependientes son:

- Índice de consistencia o coeficiente de viscosidad, K
- Índice de comportamiento, n

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El comportamiento reológico de las diferentes pastas de murta en estado fresco, y en estado descongelado de la fruta, se analizó en función de los cambios que toman las constantes reológicas, que son índice de comportamiento reológico (n) y índice de consistencia (K), y de cómo es afectada su viscosidad. A partir de las lecturas obtenidas por medio del viscosímetro Visco Star R del laboratorio Fungilab S. A. se calculan el esfuerzo de corte (σ) y la relación de deformación (γ) para luego representarlos en reogramas para cada tipo de pasta. Además los tipos de pastas analizados reológicamente se caracterizaron en función de la humedad, siendo la humedad del producto entero de $78,3 \pm 0,2$ % y para la pulpa un $84,8 \pm 0,3$ % y la pulpa azucarada presento una humedad del $72,2 \pm 0,35$ %.

El primer paso es identificar que características presenta el fluido frente a un esfuerzo de corte versus relación de deformación si es un fluido newtoniano o es un fluido no newtoniano y siguiendo esta línea se irán descartando los modelos que no se adecuen bien al comportamiento reológico del producto hasta llegar al modelo reológico que mejor represente a las pastas de murta, obtenido el modelo se determinaran las constantes reológicas las cuales se analizarán estadísticamente por medio de una comparación de varianza multifactorial, para averiguar cómo las variables independientes influyen estadísticamente sobre las constantes fundamentales. Se determina así el efecto de la concentración y la temperatura sobre la viscosidad aparente determinando las energía de activación y encontrando las ecuaciones predictivas de la viscosidad para cada pasta.

4.1 Característica reológica de la de murta en función del tiempo

El factor tiempo es decisivo para entender si un alimento posee características reológicas dependientes o independientes del tiempo y cómo ésta afecta su viscosidad. Así, por ejemplo si un fluido cambia reológicamente con el tiempo se dice que posee historia

reológica, su estructura se verá afectado por el tiempo de cizalla, como lo son los fluidos tixotrópicos y reopécticos, en caso contrario si el tiempo de cizalla no afecta la viscosidad o esfuerzo de corte, se estará hablando de los fluidos pseudoplásticos, dilatantes, o plásticos de Bingham.

Para la determinación de esta característica reológica en la murta, se escogió una pulpa de murta descongelada, ya que ésta ha sido más rigurosamente tratada, siendo despulpada y luego congelada, por lo que de las seis preparaciones de muestras es la más útil para expresar un cambio real en su reología, para la elaboración de algún producto. Para el diseño del experimento se tomaron tres muestras de murta que se escaldaron, despulparon, y luego se envasaron en bolsas plásticas para ser congeladas a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo no superior a un mes. Las muestras fueron analizadas en triplicado a una temperatura constante de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en tres lapsos de tiempo de 0-80, 85-180, 185-275 minutos, con un rango de velocidades del rotor de 1-200 rpm para cada lapso de tiempo. Las lecturas (VNE) obtenidas fueron promediadas, para cada muestra para transformarlas a esfuerzo de corte, relación de deformación, y viscosidad aparente, tal como se presenta en el ANEXO 3.

Para el análisis de los datos estos se graficaron como se muestran en las FIGURAS 9-11 en donde se representa el logaritmo natural del esfuerzo de corte versus el logaritmo natural de las revoluciones por minutos, para las tres muestras. Como se observa en las figuras, al inicio de las curvas se ve un pequeño bucle, característico de los fluidos tixotrópicos. En fluidos realmente tixotrópicos como puré de manzana, ketchup y otros estudiados por KOKINI y DICKIE (1981), este bucle denominado histéresis es más pronunciado, lo que significa que la viscosidad disminuye con el tiempo y los cambios son reversibles o parcialmente reversibles, pudiendo estos fluidos volver a su estado original. Por otra parte en un fluido pseudoplástico o *Shear thinning* la viscosidad aparente disminuye con el tiempo y los cambios son irreversibles (BOURNE, 1982). En el caso de la pulpa de murta descongelada las curvas no presentan una histéresis mayor ya que las curvas son semejantes en el resto de su trayectoria, descartándose de que se trate de un fluido tixotrópico dependiente del tiempo.

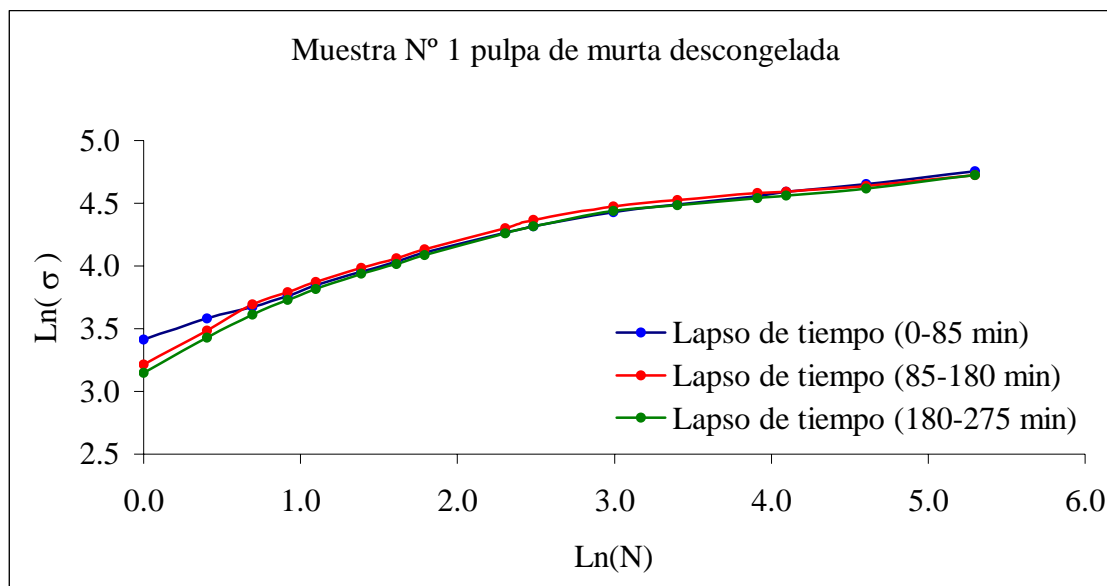


FIGURA 9. Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 1

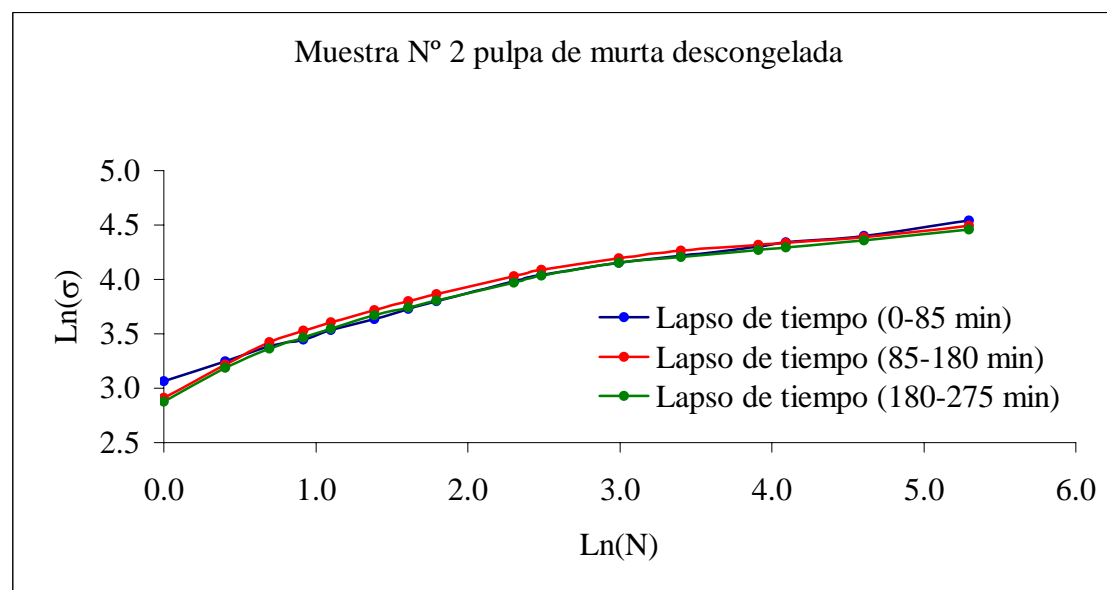


FIGURA 10. Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 2

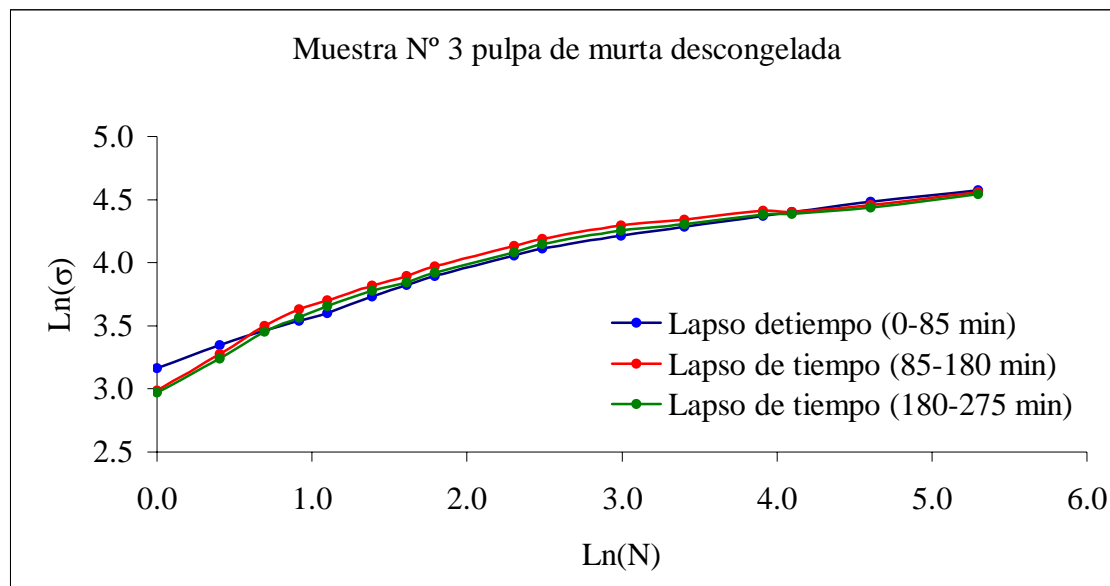


FIGURA 11. Logaritmo natural de esfuerzo de corte versus logaritmo natural de velocidad (rpm) para la muestra N° 3

Con el objeto de cuantificar la degradación de la estructura de la pulpa se utiliza la ecuación 4-1, utilizada por WILKINSON (1960), RAO y RIZVI (1986).

$$M = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\ln(N_2 / N_1)} \quad (\text{ec. 4-1})$$

La ecuación calcula el coeficiente de ruptura tixotrópico, M en Pa s, debido al aumento de la velocidad de deformación, el cual indica las pérdidas de esfuerzo de corte, siendo η_1 y η_2 las viscosidades aparentes a los tiempos t_1 y t_2 ; N_1 y N_2 representan la velocidad de giro del rotor a esos tiempos. Ya que las muestras fueron sometidas a una velocidad variable (1-200 rpm), se calcula el coeficiente de ruptura, M , de cada lapso de tiempo para las muestras respectivas, y se verifican si los coeficientes son semejantes entre ellos. Un fluido tixotrópico por ejemplo presentaría grandes diferencias entre sus coeficientes de ruptura, pero como se observa en el CUADRO 5, no ocurre esto. Se obtiene sólo una baja varianza de la población total con respecto a los coeficientes

promedio de 14,29; 10,80 y 12,01 Pa s para cada muestra, lo que ratifica que la pulpa de murta descongelada no presenta un comportamiento reológico dependiente del tiempo.

CUADRO 5. Datos del índice de ruptura para la pulpa de murta descongelada

Muestra	Lapso de Tiempo (min)	Rango de Velocidad rpm	Índice de ruptura M (Pa s)	Promedio-Varianza
N° 1	0-85	1-200	13,38	14,29 ± 0,5
	85-180	200-1	15,08	
	180-275	1-200	14,42	
N° 2	0-85	1-200	10,04	10,80 ± 0,4
	85-180	200-1	11,6	
	180-275	1-200	10,75	
N° 3	0-85	1-200	10,74	12,01 ± 0,9
	85-180	200-1	13,02	
	180-275	1-200	12,27	

4.2 Modelos reológicos para pastas de murta

Comprobando que la murta posee un comportamiento independiente del tiempo se procede a la aplicación de varios modelos matemáticos para caracterizar su reología, tal como el modelo de OSTWALD-de WAELE, el de CASSON modificado, y el de HERSCHEL-BULKLEY. Los primeros dos modelos pertenecen a los fluidos pseudoplásticos y el último, dependiendo de los valores que tomen las constantes (K , n), puede representar comportamientos newtonianos, plásticos de Bingham, pseudoplásticos o dilatantes.

Para la aplicación de estos modelos se ha diseñado un experimento con seis distintos tipos de pasta de murta: pasta de murta entera, pulpa de murta y pulpa de murta con 15% de azúcar en estado fresco y en murta previamente congelada a -25° C. A cada muestra se le midió la viscosidad newtoniana equivalente (VNE) a diferentes velocidades de rotación: 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 10; 12; 20; 30; 50; 60; 100; 200 rpm, y la toma de estos datos se realizaron a diversas temperaturas de análisis: 30, 45, 60, 75, 90 °C. Utilizando el método de conversión de MITSCHKA (1982) se obtuvo la función

de viscosidad: esfuerzo de corte en función la relación de deformación (ANEXOS 4-9). Esto permite construir los reogramas, a partir de los cuales se obtienen los modelos matemáticos para la caracterización reológica de las distintas pastas de murta.

4.2.1 Aplicación del Modelo de OSTWALD-de WAELE. El modelo de OSTWALD-DE WAELE obedece la Ley de Potencia, y al representar gráficamente los datos experimentales de esfuerzo de corte (σ) y relación de deformación ($\dot{\gamma}$) como se observa en la FIGURA 12, el esfuerzo de corte aumenta exponencialmente con respecto a la relación de deformación, dando un coeficiente de determinación (R^2) sobre 0,95 lo que está dentro del rango de aceptabilidad para la aplicación en ingeniería. Los puntos se ajustan por medio del método de los mínimos cuadrados, a la forma no linealizada, por medio de la ecuación de la curva (ec. 4-2). Se determinan las constantes reológicas fundamentales como son el índice de consistencia (K), y el índice de comportamiento reológico (n), y al transformar esta ecuación se obtiene la viscosidad aparente (ec. 4-3), (STEFFE, 1996).

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 4-2})$$

$$\eta = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{ec.4-3})$$

De la FIGURA 12 se observa que el esfuerzo de corte aumenta, y por lo tanto, la viscosidad disminuye cuando aumenta la relación de deformación. El índice de comportamiento reológico para las seis pastas (CUADRO 6) se encuentra entre 0 y 1, lo que indica un comportamiento pseudoplástico (STEFFE, 1996).

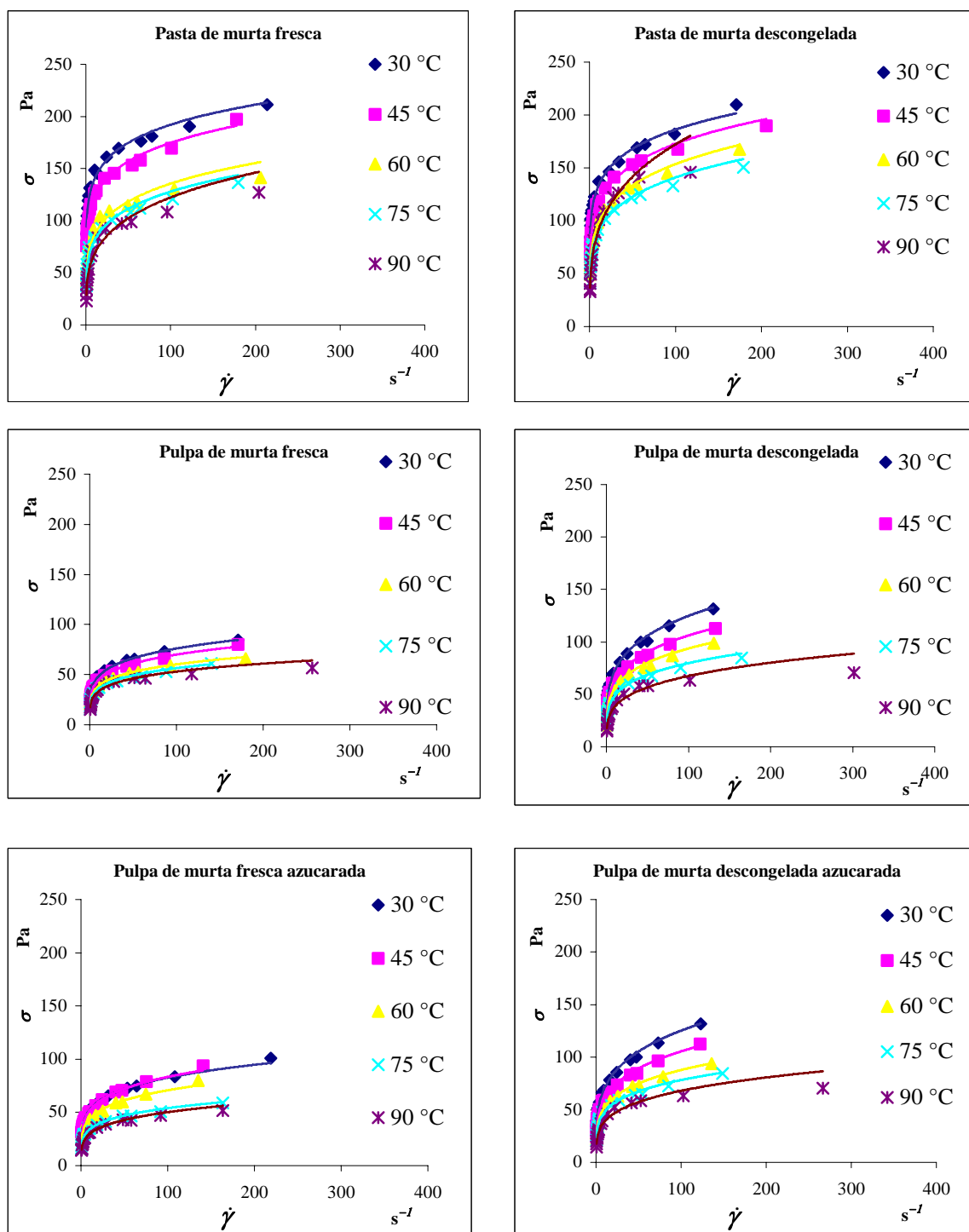


FIGURA 12. Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para diferentes pasta de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de OSTWALD-DE-WAELE

CUADRO 6. Datos obtenidos aplicando el modelo reológico de OSTWALD-de WAELE para diferentes pastas de murta en función de la temperatura

Tipo de muestra	T (° C)	K (Pa sⁿ)	<i>n</i>	<i>R</i>²
pasta de murta fresca	30	102,02	0,1374	0,9802
	45	85,243	0,1558	0,9904
	60	54,935	0,1961	0,9647
	75	50,999	0,1996	0,9633
	90	37,542	0,2564	0,9572
pasta de murta descongelada	30	93,858	0,1487	0,9926
	45	76,569	0,1766	0,9922
	60	60,921	0,2007	0,9921
	75	56,029	0,2002	0,9806
	90	46,745	0,2832	0,959
pulpa de murta fresca	30	30,415	0,1991	0,9986
	45	27,91	0,1996	0,9963
	60	24,661	0,1939	0,9926
	75	22,543	0,1993	0,9718
	90	20,917	0,2018	0,9556
pulpa de murta descongelada	30	41,823	0,2374	0,9833
	45	36,591	0,2312	0,9847
	60	32,888	0,2275	0,9735
	75	29,407	0,2169	0,9804
	90	21,466	0,2488	0,9541
pulpa de murta azucarada fresca	30	33,349	0,1971	0,9944
	45	32,184	0,2067	0,9966
	60	27,388	0,2062	0,995
	75	21,466	0,2004	0,9837
	90	17,667	0,2268	0,9771
pulpa de murta azucarada descongelada	30	39,777	0,2492	0,9838
	45	34,987	0,2397	0,987
	60	30,96	0,2266	0,9869
	75	29,121	0,2148	0,9844
	90	21,909	0,2462	0,9576

4.2.2 Aplicación del Modelo de CASSON. La ecuación de CASSON (ec. 4-4) ha sido adoptada por la *International Office of Cocoa and Chocolate* para describir el comportamiento de flujo del chocolate. Este es un modelo plástico similar al de BINGHAM, teniendo ambos modelos un umbral de fluencia inicial. Sin embargo, cada uno entregará diferentes valores del parámetro de fluidez, dependiendo del rango de datos usado en el análisis matemático (STEFFE, 1996). Para el análisis de los datos experimentales de este trabajo se utiliza el modelo de CASSON modificado, ecuación 4-5 (MIZRAHI y BERK, 1972), por presentar un comportamiento pseudoplástico:

$$\sigma^{0,5} = (\sigma_0)^{0,5} + K_1(\dot{\gamma})^{0,5} \quad (\text{ec. 4-4})$$

$$\sigma^{0,5} = (\sigma_0)^{0,5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1} \quad (\text{ec. 4-5})$$

La diferencia entre el modelo de Ley de Potencia y de CASSON modificado es que este último incorpora un nuevo parámetro σ_0 denominado umbral de fluencia, definido como el esfuerzo de corte mínimo requerido para iniciar el flujo. Según HARTNETT y HU (1989) el umbral de fluencia, σ_0 , es prácticamente un factor concreto a considerar en la ingeniería de proceso, ya que influyen de forma sustancial sobre los cálculos. Para la determinación de σ_0 hay muchos métodos, desde los métodos gráficos de extrapolación de relación de deformación versus relación de deformación, o la extrapolación de la viscosidad aparente versus relación de deformación, hasta los métodos mecánicos como la deformación entre platos paralelos, el uso de penetrómetros y muchos otros (STEFFE, 1996). Para la determinación de σ_0 para las distintas pastas de murta analizadas se utilizó un método gráfico de extrapolación, con el gráfico de relación de deformación y esfuerzo de corte. En el CUADRO 7 se representa el umbral de fluencia, donde a medida que aumenta la temperatura, éste disminuye, siendo menor en pulpa que en la pasta de murta, lo que indica que tendrá una variación con respecto a la temperatura y la composición de la pasta.

En la FIGURA 13 se representan los reogramas para el método reológico de CASSON modificado obteniéndose coeficientes de determinación sobre 0,95 lo que está aceptable

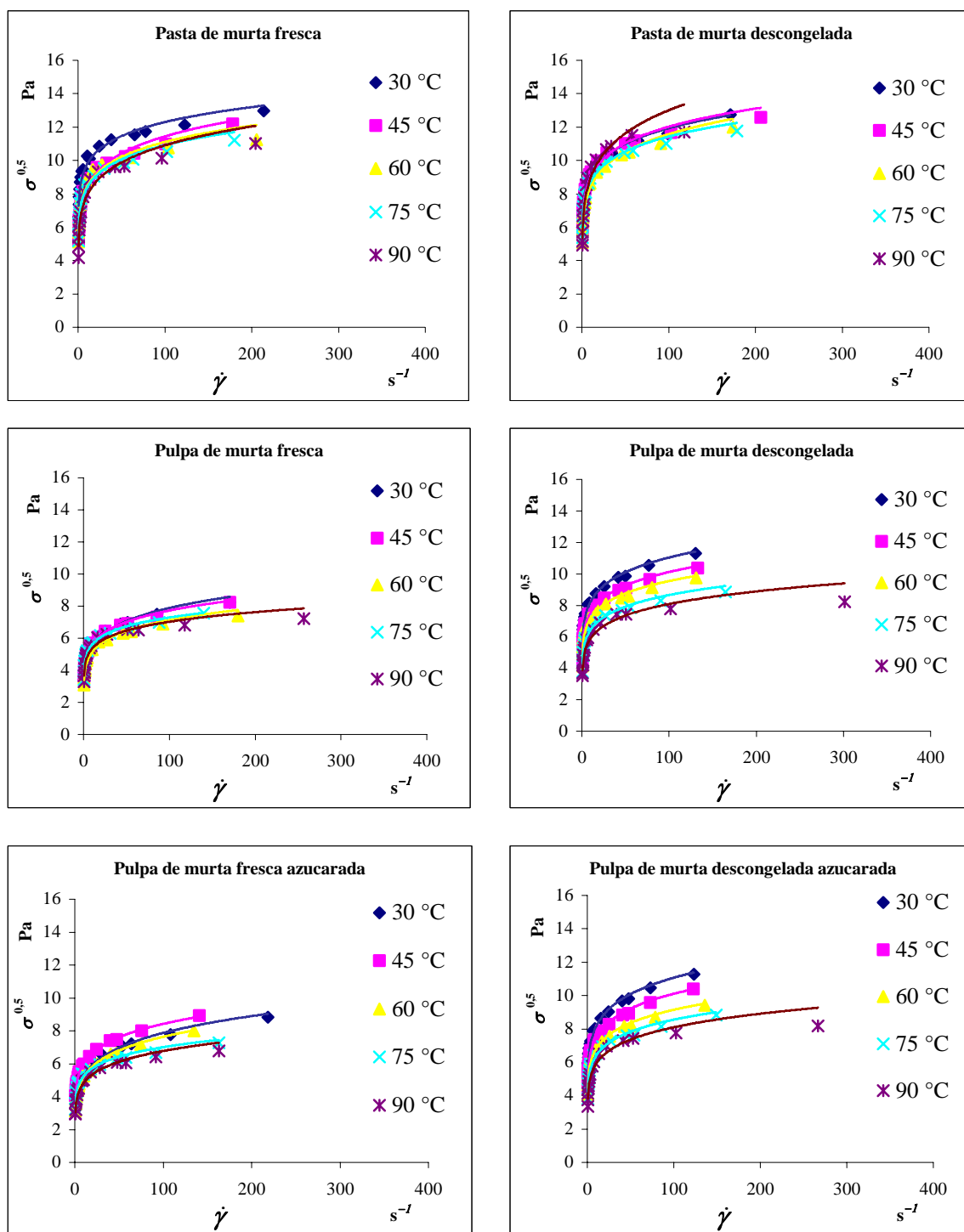


FIGURA 13. Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para diferentes pastas de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de CASSON modificado

para la aplicación en la ingeniería. Las curvas pueden ser descritas por una función de potencia, lo que indica que a medida que aumenta la relación de deformación el esfuerzo de corte aumenta, siendo una típica curva de un fluido pseudoplástico (STEFFE, 1996).

CUADRO 7. Datos obtenidos aplicando el modelo reológico de CASSON modificado para diferentes pastas de murta en función de la temperatura

Tipo de muestra	T (° C)	$(\sigma_0)^{0,5}$	K_I (Pa s ⁿ)	n_I	R^2
pasta de murta fresca	30	6,5833	7,6902	0,1014	0,9611
	45	6,9891	6,1248	0,1357	0,9714
	60	3,8252	6,3362	0,1219	0,9479
	75	3,244	6,3477	0,1177	0,9502
	90	2,3167	5,6519	0,1427	0,946
pasta de murta descongelada	30	6,8718	6,9244	0,1181	0,983
	45	5,6167	6,7643	0,1249	0,9778
	60	4,881	6,122	0,1382	0,9767
	75	3,4926	6,6183	0,1187	0,9692
	90	2,9175	6,1632	0,1621	0,9477
pulpa de murta fresca	30	4,0939	3,7992	0,1585	0,987
	45	3,4575	4,058	0,1399	0,9884
	60	3,3636	3,6857	0,1432	0,9749
	75	1,9915	4,3032	0,1146	0,9618
	90	2,4087	4,0685	0,1186	0,9423
pulpa de murta descongelada	30	2,1463	6,1342	0,1276	0,9788
	45	2,2603	5,6069	0,1282	0,9785
	60	1,9194	5,3959	0,1238	0,9665
	75	2,53	4,7901	0,1284	0,9678
	90	1,7088	4,3021	0,1369	0,946
pulpa de murta azucarada fresca	30	4,7977	3,4941	0,1764	0,9908
	45	3,8225	4,2937	0,1463	0,9986
	60	3,9543	3,5445	0,1667	0,9937
	75	4,4494	3,9327	0,1254	0,9711
	90	2,4087	3,4424	0,147	0,9609
pulpa de murta azucarada descongelada	30	2,0404	5,9619	0,1344	0,9789
	45	2,1919	5,491	0,1325	0,982
	60	2,361	5,0363	0,1296	0,9799
	75	2,5549	4,7494	0,1278	0,9741
	90	1,8427	4,294	0,1378	0,9472

4.2.3 Aplicación del Modelo de HERSCHEL-BULKLEY. Este es el modelo general del cual se desprenden todos los otros, como los fluidos newtonianos ($\sigma_0 = 0$, $n = 1$), plásticos de Bingham ($n = 1$), pseudoplásticos ($0 < n < 1$) o dilatantes ($1 < n < \infty$), dependiendo del valor que tomen las constantes reológicas. El umbral de fluencia será el mismo que para CASSON modificado, diferenciándose sólo por el valor que tome el exponente de este último, como se describe en la ecuación 4-6

$$\sigma = \sigma_0 + K (\dot{\gamma})^n \quad (\text{ec, 4-6})$$

El umbral de fluencia recibe especial atención en diseño de proceso y el control de calidad de alimentos como mantequilla, yogurt y queso. STEFFE (1996) además hace mención de estudios realizados por Ofoli en 1987, quien reportó valores para el umbral de fluencia de diferentes alimentos: ketchup (22,8 Pa), mostaza (34,0 Pa), puré de albaricoque (17,4 Pa), leche con chocolate (10,9 Pa). Todos estos valores fueron determinados por el método de la extrapolación, pero no se mencionaron las temperaturas de medición, por lo que se debe suponer que las mediciones fueron realizados a la temperatura de procesamiento de cada producto. En este estudio se analizó la variación de este parámetro en función de la temperatura. En el CUADRO 8 se observa que a medida que la temperatura aumenta, el umbral de fluencia disminuye. Esto es bien marcado en la pasta de murta fresca y descongelada, y es casi constante en pulpa de murta descongelada con y sin azúcar. En la FIGURA 15 se puede observar el comportamiento del umbral de fluencia con respecto a la temperatura para las distintas pastas de murta. Las curvas siguen una función exponencial con coeficientes de correlación sobre 0,8 en casi todos los casos, lo que indica que existe probablemente un efecto de la temperatura sobre el umbral de fluencia.

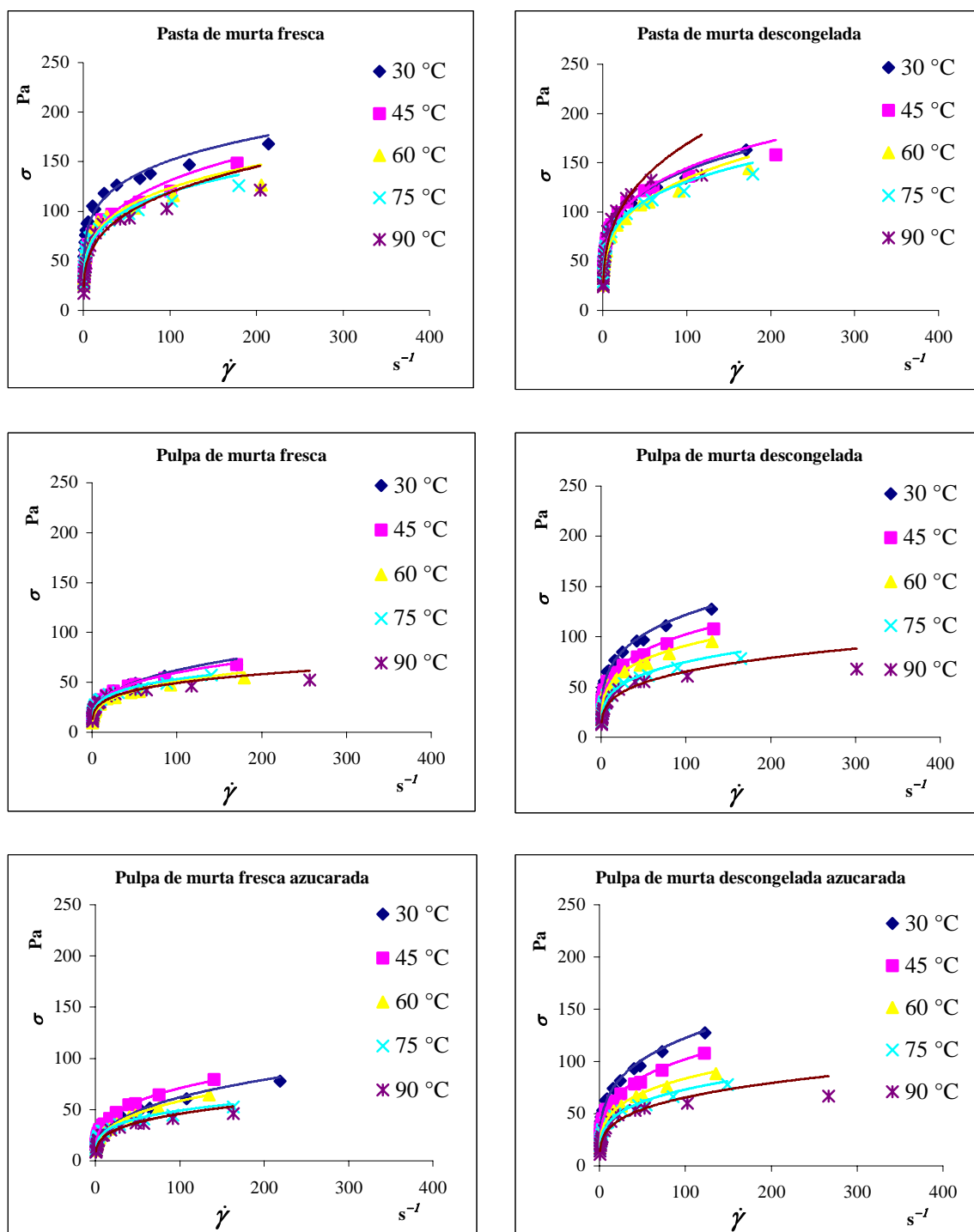


FIGURA 14. Reogramas de relación de deformación versus esfuerzo de corte para diferentes pastas de murta en función de la temperatura aplicando el modelo reológico de HERSHEY-BULKLEY

CUADRO 8. Datos obtenidos aplicando el modelos reológico de HERSHEY-BULKLEY para diferentes pastas de murta en función de la temperatura

Tipo de muestra	T (° C)	σ_0	K (Pa s ⁿ)	n	R^2
pasta de murta fresca	30	43,3398	59,139	0,2038	0,9611
	45	48,8475	37,514	0,2713	0,9714
	60	14,6321	40,148	0,2438	0,9479
	75	10,5235	40,294	0,2355	0,9502
	90	5,3671	31,944	0,2854	0,946
pasta de murta descongelada	30	47,2216	47,947	0,2363	0,983
	45	31,5473	45,756	0,2497	0,9778
	60	23,8242	37,479	0,2765	0,9767
	75	12,1982	43,802	0,2374	0,9692
	90	8,5118	37,986	0,3243	0,9477
pulpa de murta fresca	30	16,76	14,434	0,3169	0,987
	45	11,9543	16,467	0,2797	0,9884
	60	11,3138	13,584	0,2865	0,9749
	75	3,9661	18,517	0,2291	0,9618
	90	4,3011	16,552	0,2372	0,9423
pulpa de murta descongelada	30	4,1463	37,628	0,2551	0,9788
	45	5,1089	31,437	0,2563	0,9785
	60	3,6841	29,116	0,2477	0,9665
	75	6,4009	22,945	0,2568	0,9678
	90	2,9199	18,508	0,2737	0,946
pulpa de murta azucarada fresca	30	23,018	12,209	0,3528	0,9908
	45	14,6115	18,436	0,2926	0,9986
	60	15,6365	12,563	0,3333	0,9937
	75	5,9995	15,466	0,2508	0,9711
	90	5,8018	11,85	0,294	0,9609
pulpa de murta azucarada descongelada	30	4,1632	35,545	0,2687	0,9789
	45	4,8004	30,151	0,2649	0,982
	60	5,5743	25,364	0,2592	0,9799
	75	6,5275	22,557	0,2556	0,9741
	90	3,3955	18,438	0,2756	0,9472

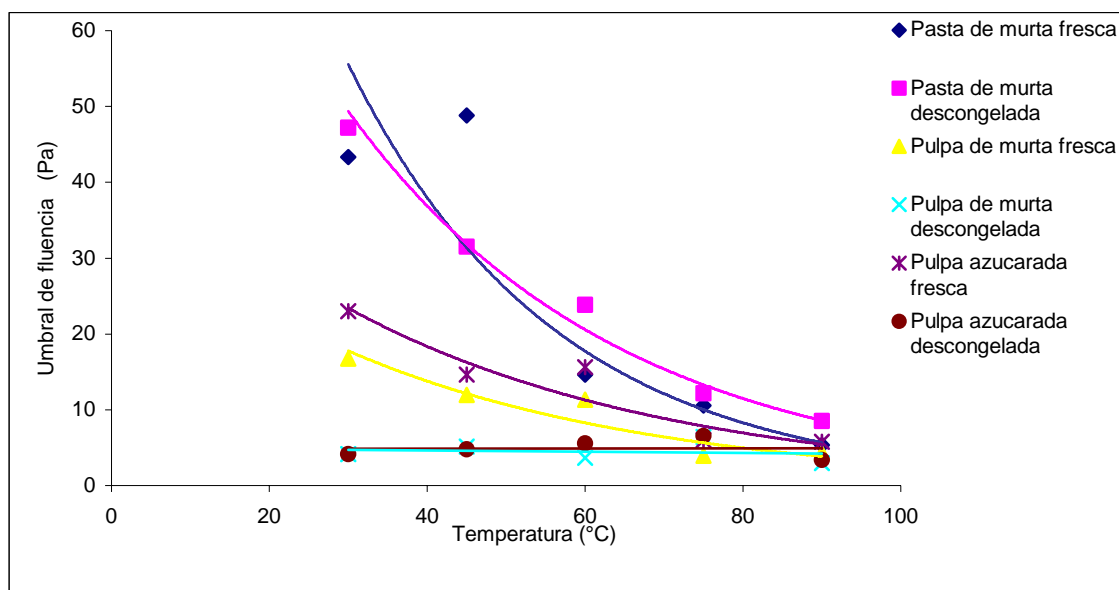


FIGURA 15. Umbral de fluencia versus temperatura para pasta y pulpa de murta

4.2.4 Elección del modelo reológico, para las pastas de murta. Analizado los tres modelos reológicos planteados y basados en el error estándar, se eligió el modelo de OSTWALD-de-WAELE, por presentar el menor error entre los tres, como se observa en el CUADRO 9. El error estándar se determinó según la ecuación 4-7.

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_x)^2}{n-2}} \quad (\text{ec. 4-7})$$

donde $s_{y,x}$ es el error estándar estimado de y en x , con n igual al número de observaciones en la muestra, y_i es el valor a ser estimado, \bar{y}_x es la estimación correspondiente de y hasta x . Además las propiedades del error estándar de estimación son análogos a aquellos de la desviación estándar.

El modelo de Ley de Potencia se adecua mejor a los datos experimentales para cualquiera de las pastas de murta, siendo el error estándar menor en comparación con los otros modelos. Un estudio similar fue aplicado a una solución de carragenina al 1% a 25 °C por STEFFE (1996), y el modelo de ley de potencia resultó también ser el más

conveniente de entre cuatro modelos con un error estándar de 0,094. En el caso de la murta el valor del error estándar más bajo de 0,0127 se registró en pulpa de murta fresca a 30 °C para el modelo de ley de potencia . El más alto fue de 0,1375 para pasta de murta fresca para los modelos de HERSCHEL-BULKLEY y CASSON modificado.

CUADRO 9. Determinación del error estándar (s_{yx}) para los diferentes modelos reológicos

Tipo pasta	Modelo	y	x	s_{yx}				
				30 °C	45 °C	60 °C	75 °C	90 °C
Pasta de murta fresca	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0373	0,0278	0,0735	0,0774	0,1093
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0783	0,0844	0,1118	0,1071	0,1375
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0783	0,0844	0,1118	0,1071	0,1375
Pasta de murta descongelada	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0228	0,0286	0,0328	0,0541	0,1034
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0550	0,0688	0,0782	0,0813	0,1346
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0550	0,0688	0,0782	0,0813	0,1346
Pulpa de murta fresca	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0127	0,0207	0,0305	0,0659	0,0880
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0622	0,0518	0,0834	0,0887	0,1187
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0622	0,0518	0,0834	0,0887	0,1187
Pulpa de murta descongelada	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0583	0,0542	0,0727	0,0589	0,1083
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0707	0,0714	0,0893	0,0899	0,1298
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0707	0,0714	0,0893	0,0899	0,1298
Pulpa de murta azucarada fresca	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0251	0,0194	0,0241	0,0489	0,0658
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0578	0,0179	0,0441	0,0820	0,1125
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0578	0,0179	0,0441	0,0820	0,1125
Pulpa de murta azucarada descongelada	Ostwald - de Waele	$\ln \sigma$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0602	0,0510	0,0488	0,0512	0,1036
	Herschel-Bulkley	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0742	0,0665	0,0694	0,0790	0,1301
	Casson	$\ln (\sigma - \sigma_0)$	$\ln \dot{\gamma}$	0,0742	0,0665	0,0694	0,0790	0,1301

4.3 Efecto de las características físicas de las pastas de murta y de la temperatura sobre el comportamiento reológico

Se puede postular que el modelo que describe mejor el comportamiento de pastas de murta es el de la Ley de Potencia. En el CUADRO 6 se representan las constantes reológicas fundamentales, los cuales pueden ser analizados para conocer al efecto que tienen las características físicas de los diferentes tipos de pasta y la temperatura sobre las constantes reológicas fundamentales. Se puede averiguar además si existen diferencias estadísticamente significativas en los distintos valores de los índices reológicos determinados, por medio de un análisis de varianza multifactorial.

CUADRO 10. Análisis de varianza para las constantes reológicas fundamentales

Fuente	Suma Cuadrado	Df	Prom. Cuadrado	Razón- F	Valor-P
Efectos principales – Índice de consistencia					
A: temperatura	3197,79	4	799,448	9,61	0,0002
B: tipo de pasta	9622,22	5	1924,44	23,12	0,0000
Residuo	1664,62	20	83,231		
TOTAL (corregido)	14484,6	29			
Efectos principales – Índice de comportamiento reológico					
A: temperatura	0,00882097	4	0,00220524	3,77	0,0192
B: tipo de pasta	0,00887005	5	0,00177401	3,04	0,0337
Residuo	0,011688	20	0,0005844		
TOTAL (Corregido)	0,029379	29			

El CUADRO 10 representa el ANDEVA que es el cuadro de descomposición de la variabilidad del índice de consistencia como también del índice de comportamiento debido a los factores de temperatura y tipo de pasta. El valor P indica si la variabilidad de estos parámetros reológicos es estadísticamente significativo en cada uno de los casos. En ambos casos los valores de P son menores que 0,05, lo que indica que el efecto de los factores de temperatura y tipo de pasta es estadísticamente significativo a una nivel de confiabilidad de 95,0 %. El índice de consistencia demuestra una mayor variación con respecto al tipo de pasta, mientras que el índice de comportamiento reológico varía más con la temperatura del producto.

4.3.1 Diferencia entre las propiedades reológicas de pastas a partir de murta fresca y murta descongelada. Son varios los cambios que ocurren durante la congelación de una fruta, dependiendo si el proceso de congelación se ha hecho en forma rápida o lenta. SPIESS (1980) describe los cambios que provoca la congelación en la estructura de la fruta, registrándose los mayores cambios a nivel de la pared celular, donde ocurre una coagulación del plasma que conlleva a la separación del mismo de la pared de la célula y a la exudación irreversible de agua de las células. También hay una pérdida de la semi-permeabilidad de la membrana, lo que resulta en la caída de turgencia de las células. Se pierden además propiedades importantes de textura, y se mezclan los constituyentes de la célula, llevando a reacciones de degradación y de formación de sustancias no deseadas. Debido al daño que sufre la pectina, se pierde la cohesión del tejido. Todo esto es agravado aún más si el fruto ha sido escaldado.

Al comparar las constantes fundamentales (K , n) de ambas muestras se observa en el CUADRO 6 que en la pasta de murta fresca el índice de consistencia es mayor solo para las primeras dos temperaturas (30, 45 °C) siendo mayor para la pasta de murta descongelada del resto de las temperaturas, la primera presenta un rango de consistencia que varía de 102,02 a 37,542 Pa sⁿ y para la segunda el rango va de 93,858 a 46,745 Pa sⁿ. Con respecto al índice de comportamiento reológico la pasta de murta descongelada presenta un leve aumento con respecto la pasta de murta fresca.

En los reogramas construidos a partir del modelo de la Ley de Potencia (FIGURA 12) para las diferentes tipos de pasta, se puede observar que a medida que aumenta la temperatura el esfuerzo de corte disminuye. Y al comparar los reogramas de la pasta de murta fresca con la de la pulpa de murta fresca y de la pulpa de murta descongelada para una misma temperatura y una relación de deformación constante, se observan valores mayores para el esfuerzo de corte en la pasta que en las pulpas; así por ejemplo, para una temperatura de 60 °C y una relación de deformación de 100 s⁻¹ para la pasta de murta fresca se tiene un esfuerzo de corte de 135,53 Pa y para la pulpa de murta fresca un esfuerzo de corte de 60,23 Pa, pero para la pulpa de murta descongelada se presenta un valor de 93,76 Pa, lo que indica que en comparación con la pulpa fresca se observa una mayor consistencia como se demuestra en el CUADRO 6, donde los índices de consistencia de la pulpa descongelada son mayores que los de la pulpa fresca.

Para lograr una comparación del comportamiento reológico de los diferentes tipos de pasta de murta, se procedió a determinar la viscosidad relativa con respecto a la viscosidad aparente de la pasta de murta fresca a la velocidad de rotación de 1,0 rpm, la cual es denominada con η_0 y tiene un valor de 154 Pa s. Este valor sirve de referencia para transformar las viscosidades aparentes determinadas para todas las muestras de pastas a distintas velocidades de rotación. Se calcula la viscosidad relativa (η_r) según la ecuación 4-7. En el CUADRO 11, se clasifican además los resultados en función de la temperatura de tratamiento.

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (\text{ec. 4-8})$$

CUADRO 11. Datos de la viscosidad relativa de distintos tipos de pasta murta

Temperatura	Velocidad N (rpm)	Viscosidad relativa de pasta fresca	Viscosidad relativa de la pasta descongelada	Viscosidad relativa de la pulpa fresca	Viscosidad relativa de la pulpa descongelada
30 °C	1	1,000	0,834	0,253	0,481
	1,5	0,667	0,568	0,179	0,377
	2	0,496	0,424	0,141	0,297
	2,5	0,399	0,338	0,118	0,244
	3	0,337	0,277	0,100	0,206
	4	0,242	0,204	0,079	0,155
	5	0,192	0,161	0,065	0,124
	6	0,154	0,134	0,056	0,103
	10	0,091	0,083	0,038	0,063
	12	0,071	0,067	0,032	0,051
	20	0,043	0,042	0,021	0,032
	30	0,029	0,030	0,015	0,023
	50	0,018	0,020	0,010	0,015
	60	0,015	0,017	0,008	0,013
	100	0,010	0,012	0,006	0,010
200	0,006	0,008	0,003	0,007	
45 °C	1	0,813	0,697	0,226	0,421
	1,5	0,548	0,494	0,165	0,322
	2	0,412	0,383	0,129	0,254
	2,5	0,324	0,309	0,108	0,207
	3	0,265	0,265	0,092	0,175
	4	0,198	0,203	0,074	0,132
	5	0,164	0,167	0,061	0,106
	6	0,136	0,142	0,052	0,088
	10	0,082	0,088	0,035	0,054
	12	0,068	0,073	0,029	0,043
	20	0,042	0,046	0,019	0,027
	30	0,028	0,032	0,014	0,019
	50	0,018	0,020	0,009	0,013
	60	0,016	0,017	0,008	0,011
	100	0,011	0,011	0,005	0,008
200	0,007	0,006	0,003	0,006	
60 °C	1	0,611	0,607	0,239	0,393
	1,5	0,430	0,437	0,169	0,311
	2	0,343	0,344	0,132	0,243
	2,5	0,279	0,278	0,107	0,200
	3	0,245	0,236	0,090	0,169
	4	0,186	0,180	0,070	0,125
	5	0,154	0,146	0,057	0,099
	6	0,128	0,125	0,049	0,081
	10	0,077	0,081	0,031	0,048

CUADRO 11. (Continuación)

Temperatura	Velocidad N (rpm)	Viscosidad relativa de pasta fresca	Viscosidad relativa de la pasta descongelada	Viscosidad relativa de la pulpa fresca	Viscosidad relativa de la pulpa descongelada
60 °C	12	0,065	0,066	0,026	0,038
	20	0,040	0,042	0,017	0,023
	30	0,026	0,029	0,011	0,016
	50	0,015	0,019	0,007	0,011
	60	0,013	0,016	0,006	0,009
	100	0,008	0,010	0,004	0,007
	200	0,004	0,006	0,002	0,005
75 °C	1	0,631	0,609	0,274	0,327
	1,5	0,406	0,446	0,196	0,251
	2	0,339	0,354	0,156	0,196
	2,5	0,279	0,290	0,128	0,160
	3	0,237	0,242	0,106	0,136
	4	0,184	0,185	0,078	0,102
	5	0,147	0,149	0,060	0,083
	6	0,122	0,123	0,049	0,070
	10	0,071	0,073	0,028	0,043
	12	0,057	0,062	0,023	0,035
	20	0,033	0,037	0,014	0,022
	30	0,022	0,026	0,009	0,015
	50	0,013	0,016	0,006	0,009
	60	0,011	0,014	0,005	0,008
	100	0,008	0,009	0,004	0,005
200	0,005	0,005	0,003	0,003	
90 °C	1	0,427	0,512	0,234	0,220
	1,5	0,332	0,351	0,168	0,155
	2	0,280	0,300	0,130	0,140
	2,5	0,242	0,284	0,108	0,119
	3	0,210	0,251	0,097	0,101
	4	0,158	0,202	0,077	0,084
	5	0,128	0,171	0,062	0,073
	6	0,111	0,152	0,052	0,064
	10	0,073	0,105	0,031	0,041
	12	0,062	0,094	0,026	0,035
	20	0,039	0,062	0,016	0,022
	30	0,026	0,043	0,010	0,016
	50	0,015	0,028	0,006	0,009
	60	0,012	0,024	0,005	0,007
	100	0,007	0,016	0,003	0,004
200	0,004	0,008	0,001	0,002	

Como se observa en la FIGURA 16 la viscosidad relativa disminuye cuando aumenta la velocidad de cizalla (rpm), siendo esta disminución más evidente en la pasta de murta fresca y menor en la pulpa de murta descongelada. La mayor viscosidad aparente se registra en la pasta fresca con un punto inicial de 154 Pa s a 1 rpm y 30 °C y la menor viscosidad es de 0,22 Pa s a 200 rpm y 90°C para la pulpa de murta fresca. Al observar las diferentes curvas en función del tipo de pasta, se encuentra que la curva de la pasta de murta fresca posee valores mayores de viscosidad en relación a las demás curvas de pastas, pero a 75 °C la curva de pasta de murta fresca y pasta de murta congelada se igualan, y a 90 °C la curva de pasta de murta descongelada pasa a ser mayor a todas las otras incluso a la de la pasta de murta fresca. Esto se puede interpretar como un efecto de gelificación que tiene lugar en la murta descongelada dada la presencia de pectina liberada, lo que aumenta la viscosidad a partir de los 75 °C. Al comparar la curva de la pulpa descongelada con la curva de la pulpa fresca, ésta posee valores mayores de viscosidad, este comportamiento se repite para todas las temperaturas, explicándose como un aumento de la consistencia, producto tal vez de la deshidratación que tiene lugar durante la congelación, donde el producto además de ser dañado a nivel de la pared celular con pérdida de líquido por goteo (*drip losses*), ocurre un desmenuzamiento del tejido debido al daño que sufren sustancias como la pectina, produciendo un efecto espesante del medio, aumentando así la viscosidad.

En la FIGURA 17 se representa la viscosidad relativa de cuatro pastas de murta en función de la temperatura. Se observa una disminución general de la viscosidad relativa con la temperatura. Al aumentarse la velocidad de cizalla la viscosidad relativa tiende a un valor asintótico, un comportamiento que tiene todas las muestras. Se observa, sin embargo, que hay inicialmente diferencias notables entre los valores de viscosidad en tres de las muestras. Para la pulpa de murta fresca, la viscosidad relativa es prácticamente independiente de la temperatura. Se observa claramente que las pulpas son la que tienen la menor viscosidad, tal vez por no contener ni semilla ni hollejo, materiales que con alta probabilidad inciden sobre la magnitud de la viscosidad.

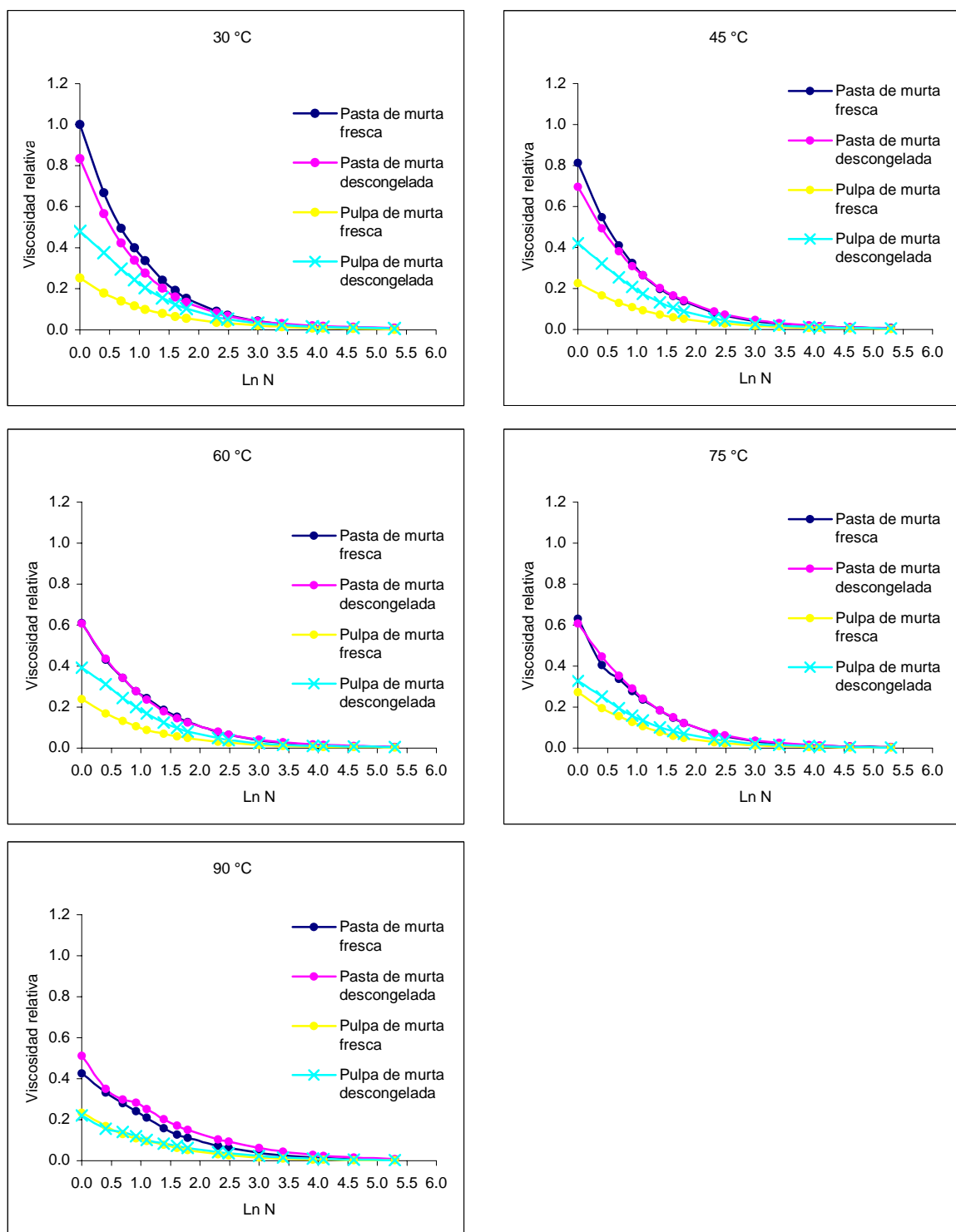


FIGURA 16. Viscosidad relativa versus $\ln N$ (rpm) para diferentes temperatura en función del tipo de pasta de murta

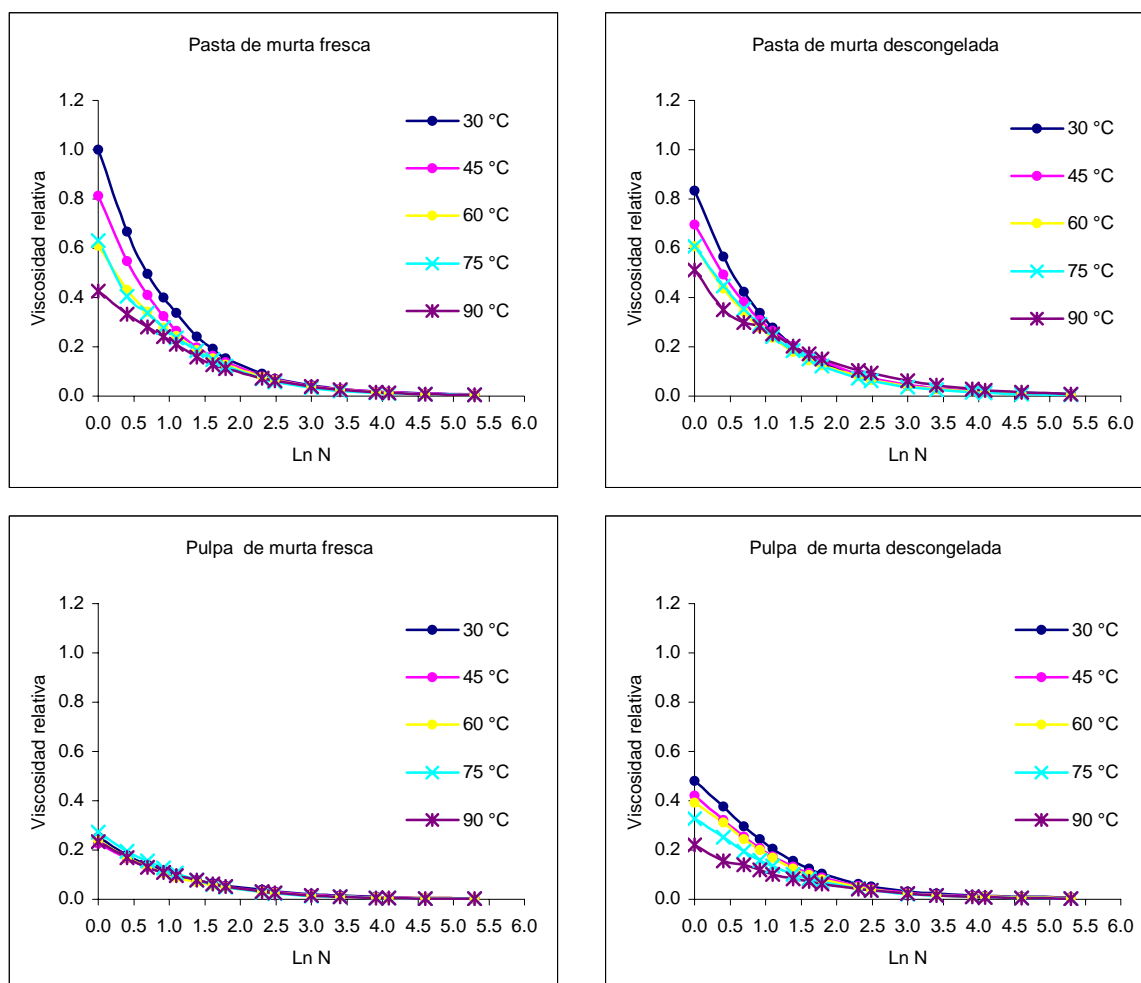


FIGURA 17. Viscosidad relativa versus $\ln N$ (rpm) para diferentes pasta de murta en función de la temperatura

4.3.2 Comparación de pulpa sin azúcar y pulpa azucarada de murta fresca. Para conocer el efecto que ejerce el azúcar sobre la viscosidad aparente de una pulpa de murta fresca, se comparan los índices de consistencia y de comportamiento reológico para las pulpas con y sin azúcar (CUADRO 6). El efecto que ejerce la concentración de sólidos solubles sobre un sistema homogéneo es el de aumentar la viscosidad o índice de consistencia como lo reportaron SARAVACOS (1970) y RAO *et al.*, 1984, quienes estudiaron el efecto de esta concentración sobre el comportamiento reológico de zumos y cremogenados de fruta, utilizando dos modelos matemáticos, el modelo potencial y el modelo exponencial descritos en las ecuaciones 4-9 y 4-10 respectivamente.

$$\eta = k_1 C^{A_1} \quad (\text{ec. 4-9})$$

$$\eta = k_2 \exp(A_2 C) \quad (\text{ec. 4-10})$$

siendo k_1 , k_2 , A_1 y A_2 son constantes y C es la concentración de sólidos solubles; η puede ser la viscosidad o el índice de consistencia. Se ha encontrado que en soluciones de azúcar, la viscosidad aumenta con el aumento de la concentración de azúcar a una temperatura constante. Por otro lado, a una concentración constante, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura. Tanto el aumento como la disminución de viscosidad sigue una función no lineal de forma exponencial (BOURNE, 1982).

Al graficar los datos se observa que el modelo exponencial es el más adecuado para interpretar el efecto del azúcar en la pulpa de murta. En CUADRO 12 se presentan las diferentes ecuaciones válidas para cada temperatura de la viscosidad aparente en función de la concentración de azúcar y relación de deformación. Estas ecuaciones relacionan la viscosidad aparente entre concentraciones de azúcar (0, 15%). Se puede observar que la constante k_2 disminuye con la temperatura de 30,415 Pa s a 30 °C a 20,917 Pa s a 90 °C. La constante A_2 aumenta en el rango de temperatura de 30 °C a 45 °C, para luego disminuir hasta valores negativos a las temperaturas de 75 y 90 °C. Esto puede indicar que al aumentar la concentración de azúcar la consistencia de la pulpa azucarada empieza a disminuir a temperaturas sobre 60 °C como se aprecia en la FIGURA 18.

CUADRO 12. Ecuaciones predictivas en función de la concentración y relación de deformación para la determinación de la viscosidad aparente de pulpa de murta fresca

Temperaturas (° C)	Ecuación Predictiva de la viscosidad aparente (Pa s)
30	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 30,415 \exp[0,0061 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
45	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 27,91 \exp[0,0095 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
60	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 24,661 \exp[0,007 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
75	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 22,543 \exp[-0,0033 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
90	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 20,917 \exp[-0,0113 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$

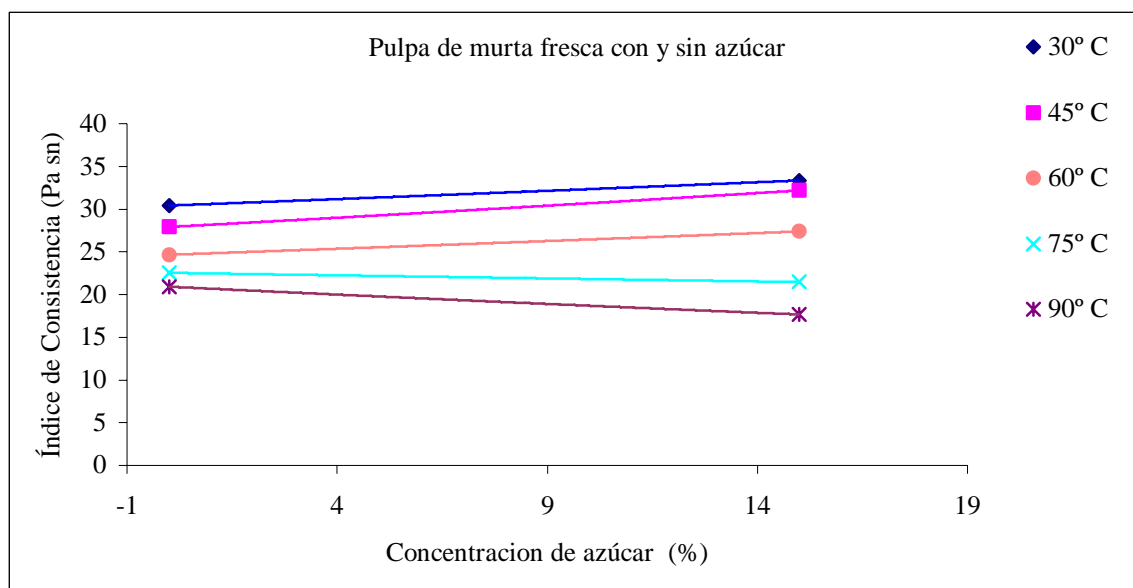


FIGURA 18. Efecto de la concentración de azúcar sobre el índice de consistencia para pulpa de murta fresca con y sin azúcar

4.3.3 Comparación de pulpa sin azúcar y pulpa azucarada de murta descongelada.

De manera similar al caso anterior se graficaron los datos y se obtuvieron las ecuaciones exponenciales, las cuales describen las variaciones de los índices reológicos en función de la concentración y relación de deformación a distintas temperaturas. Como se puede observar la constante k_2 de la muestra descongelada es mayor que en el caso de las muestras frescas; por ejemplo a una temperatura de 30° C, la pulpa fresca tiene un valor k_2 de 30,415 Pa s (CUADRO 13) en cambio para pulpa descongelada este valor es de 41,823 Pa s (CUADRO 14), lo que indica que a parte de la concentración de azúcar, la congelación también tiene un efecto de aumentar la viscosidad de las muestras, lo que se debe probablemente a que durante la congelación la pulpa sufre una deshidratación que concentra aún más los sólidos presentes en la pasta, resultando finalmente en un aumento de la viscosidad aparente.

Con respecto a cómo es afectado el índice de comportamiento reológico (n) se observa que hay un leve aumento de este índice: la pulpa fresca sin azúcar y con azúcar tienen índices de comportamiento de 0,199 y 0,207 respectivamente. Por otra parte en la pulpa descongeladas esta diferencia es casi mínimo, el índice varía de 0,232 a 0,235 para la pulpa sin y con azúcar respectivamente. Considerando estos cuatro valores se puede decir que la congelación provocó un leve aumento en el índice de comportamiento reológico, el cual indica generalmente cuán cercano se está de un fluido newtoniano. Este comportamiento que resulta del efecto de congelamiento, parece ser un comportamiento específico para un producto. MIRZAHÍ y BERK (1972) encontraron que el índice de comportamiento reológico disminuía al aumentar la concentración de sólidos solubles en jugo de naranja, mientras que SAENZ y COSTELL (1986) demostraron que en un producto de limón la concentración de sólidos solubles no afectaba al índice de comportamiento reológico. Esto demuestra que aunque los productos pueden ser de la misma naturaleza, como en el ejemplo de los cítricos, el comportamiento reológico puede resultar diferente.

CUADRO 13. Ecuaciones predictivas en función de la concentración y relación de deformación para la determinación de la viscosidad aparente de pulpa de murta descongela

Temperaturas (° C)	Ecuación Predictiva de la viscosidad aparente (Pa s)
30	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 41,823 \exp[-0,0033 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
45	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 36,591 \exp[-0,003 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
60	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 32,888 \exp[-0,004 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
75	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 29,407 \exp[-0,0007 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$
90	$\eta = f(C, \dot{\gamma}) = 21,466 \exp[-0,0014 \cdot C] \dot{\gamma}^{\bar{n}-1}$

En la FIGURA 19 se observa claramente que la pendiente de todas las curvas es negativa. Esto es una fuerte indicación que en pulpa de murta descongela al aumentar la temperatura y la concentración la consistencia también disminuye. Se puede reconocer aquí que el azúcar no ejerce un papel muy importante en aumentar la consistencia. Aparentemente ocurre un disminución de ésta. Es muy probable que el azúcar aumenta la presión osmótica, lo que lleva a la liberación del agua desde las células aún intactas, aumentando la cantidad de líquido suelto, disminuyendo así la viscosidad de la pulpa descongela.

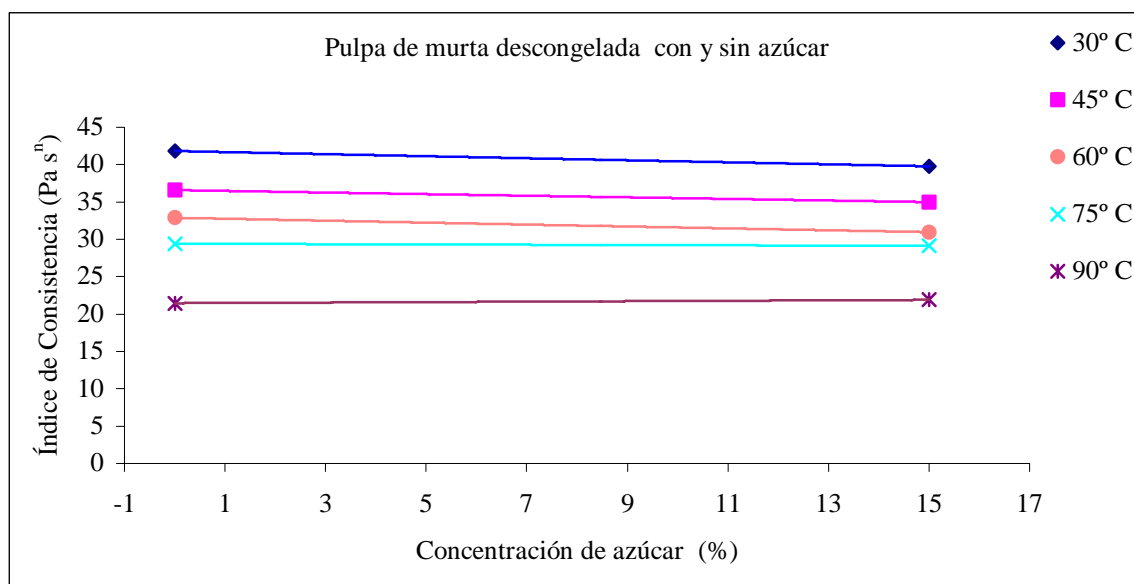


FIGURA 19. Efecto de la concentración de azúcar sobre el índice de consistencia para pulpa de murta descongelada con y sin azúcar

4.3.4 Variación de la viscosidad en función de la temperatura. Se analiza el efecto que tiene la temperatura sobre la viscosidad en los distintos tipos de pasta de murta: pasta de murta fresca, pulpa de murta con o sin azúcar en estado fresco, pasta de murta descongelada y pulpa de murta con y sin azúcar descongelada. El efecto del esfuerzo de corte y la temperatura puede ser combinado en una ecuación de tipo Arrhenius (HARPER y EL SAHRIGI, 1965):

$$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = K_T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (\dot{\gamma})^{\bar{n}-1} \quad (\text{ec. 4-11})$$

Se puede también formular la ecuación en término del esfuerzo de corte:

$$\sigma = f(T, \dot{\gamma}) = K_T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (\dot{\gamma})^{\bar{n}} \quad (\text{ec. 4-12})$$

Los parámetros de E_a , \bar{n} y K_T se determinaran usando un número de datos determinados en el rango de temperatura de 30 a 90 °C. La utilización de este tipo de modelos es muy útil para resolver muchos problemas en Ingeniería de Alimentos

asociados a los requerimientos para predecir el perfil de velocidad del fluido o a la caída de presión en tuberías (STEFFE, 1996)

En el ANEXO 5 se describen en detalle el cálculo para obtener los datos utilizados en graficar las FIGURAS 20 y 21. Se representa gráficamente el logaritmo natural del índice de consistencia ($\ln K$) versus la inversa de la temperatura ($1/T$) y mediante un ajuste lineal de los datos se obtienen la energía de activación, E_a , a través de la pendiente de la recta, y la constante de consistencia, K_T , la cual corresponde a la ordenada en el origen (valor del intercepto). Ambos parámetros están en función de la temperatura. Como se puede observar en el rango de 30 °C a 90° C (303 K a 363 K) existe una tendencia al aumento de $\ln K$ a medida que la temperatura disminuye. Se observa también que el $\ln K$ es mayor para la fruta entera que para la pulpa de ésta, tanto para la fruta fresca como para la descongelada. Los índices de correlación son aceptables ya que se encuentran sobre 0,90.

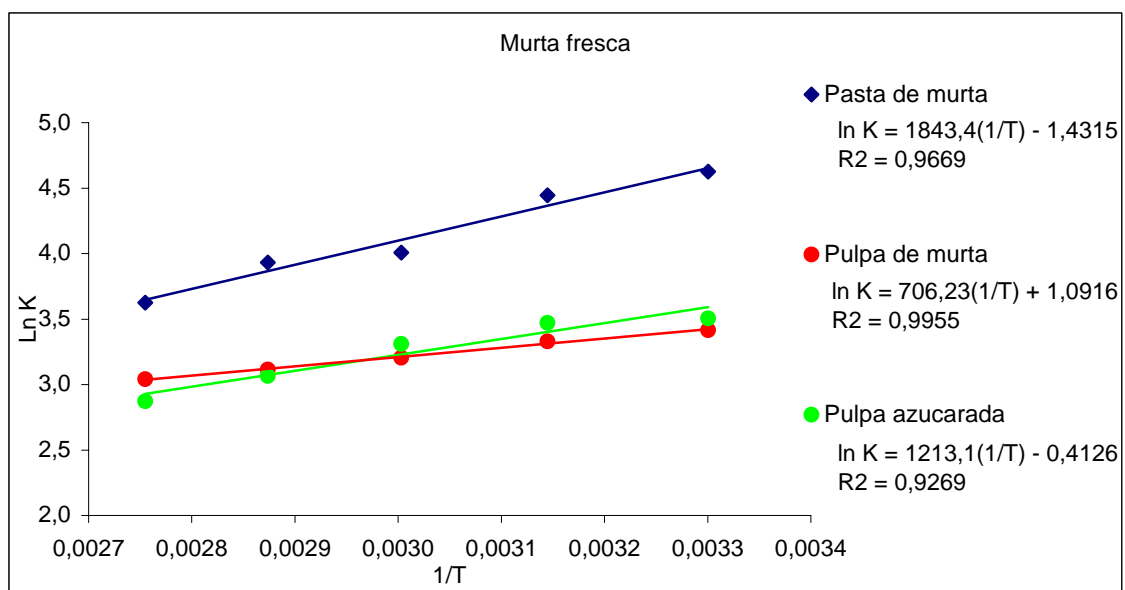


FIGURA 20. Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de temperatura para la murta fresca

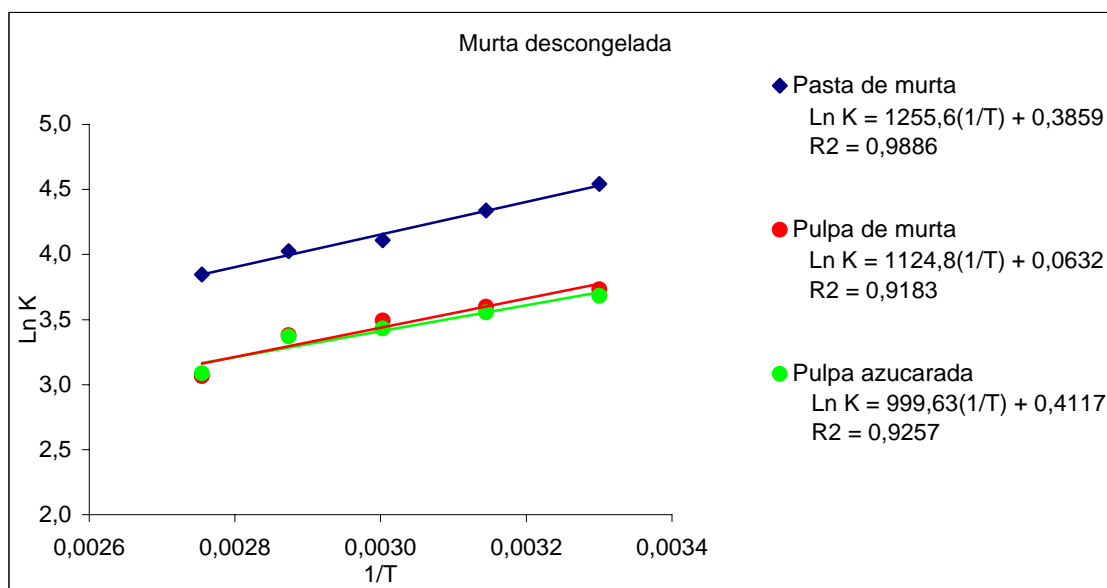


FIGURA 21. Efecto de la temperatura sobre el coeficiente de temperatura para la murta descongelaada

Los valores que se obtuvieron para la energía de activación están representados en el CUADRO 14 y sirven para evaluar el efecto de temperatura sobre la viscosidad. Mientras más alto el valor de la energía de activación, más rápido será el cambio en la viscosidad con la temperatura (STEFFE, 1996). Visto que la pasta fresca y descongelaada tienen energía de activación de 15,326 kJ/mol y de 10,085 kJ/mol respectivamente, lo que equivale a una diferencia de 5,241 kJ/mol, se puede afirmar que la congelación ejerce un efecto sobre la propiedad reológica, lo que significa que hay menor cambio de la viscosidad en el producto que ha sido congelado.

En el caso de las pulpas se observa un comportamiento diferente al caso anterior de las pastas de murta, las cuales son mezcla de pulpa de murta con las semillas y el hollejo. Al aumentar la temperatura la energía de activación disminuye. La pulpa sin azúcar en estado fresco tiene una energía de activación de 5,871 kJ/mol en comparación con la pulpa sin azúcar descongelaada, que tiene una energía de activación de 9,352 kJ/mol, lo que significa que la viscosidad aumenta más rápido en el caso de las pulpas descongelaadas. Es posible que esto se deba a la deshidratación que se produce por la congelación a -25°C . Cuando se agrega azúcar a la pulpa los valores de la energía de

activación muestra un alza general para los dos caso de producto fresco y descongelado. En el caso de pulpa con azúcar en estado fresco se tiene una energía de activación de 10,1 kJ/mol, mientras que en el caso de la pulpa con azúcar descongelada el valor es de 8,3 kJ/mol. Esto indica que la viscosidad de pulpa de murta azucarado cambia de forma general más rápido con la temperatura que la pulpa sin azúcar.

CUADRO 14. Resultados de la energía de activación, índice de consistencia, índice de comportamiento reológico, y índice de correlación para diferentes tipos de muestra de murta

Tipo de Muestra	E_a kJ/mol	K_T (Pa · s $^{\bar{n}}$)	\bar{n}	R^2
pasta de murta fresca	15,326	0,239	0,189	0,9669
pulpa de murta fresca	5,871	2,979	0,199	0,9955
pulpa azucarada de murta fresca	10,085	0,662	0,207	0,9269
pasta de murta descongelada	10,439	1,471	0,202	0,9886
pulpa de murta descongelada	9,352	1,065	0,232	0,9183
pulpa azucarada de murta descongelada	8,311	1,509	0,235	0,9257

En el CUADRO 15 se tienen las ecuaciones que relacionan la viscosidad aparente (K_T en Pa sⁿ) en función de la relación de deformación $\dot{\gamma}$ y de la temperatura absoluta T en K para el rango de temperatura entre 30 a 90° C.

CUADRO 15. Ecuaciones predictivas para las diferentes muestras de pasta de murta

Muestras	Ecuación Predictiva dela viscosidad aparente (Pa s)
Pasta de murta fresca	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 0,239 \exp\left(\frac{1843,4}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,1891}$
Pulpa de murta fresca	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 2,979 \exp\left(\frac{706,23}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,1987}$
Pulpa de murta azucarada	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 0,6619 \exp\left(\frac{1213,1}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,2074}$
Pasta de murta descongelada	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 1,4709 \exp\left(\frac{1255,6}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,2019}$
Pulpa de murta descongelada	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 1,0652 \exp\left(\frac{1124,8}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,2324}$
Pulpa de murta azucarada descongelada	$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = 1,5094 \exp\left(\frac{999,63}{T}\right)(\dot{\gamma})^{0,2353}$

5. CONCLUSIONES

- Todos los tipos de pasta de murta analizados, pasta de murta entera, pulpa de murta con y sin semilla y pulpa azucarada con y sin semilla, demuestran un comportamiento no-newtoniano independiente del tiempo de un fluido pseudoplástico.
- Los tres modelos reológicos analizados, el modelo de Ostwald-de Waele, el modelo de Casson modificado y el modelo de Herschel-Bulkley, son relevantes para la descripción del comportamiento reológico de las pastas de murta. Sin embargo, el modelo de Ostwald-de Waele, conocido también como el modelo de la Ley de Potencia, es el que más se ajusta a los datos reológicos obtenidos experimentalmente.
- Los índices de consistencia obtenidos a partir del modelo de Ostwald-de Waele disminuyen con un alza de temperatura y es posible modelar la variación de los mismos en función de la temperatura con ecuaciones del tipo Arrhenius.
- Los índices de comportamiento obtenidos a partir del modelo de Ostwald-de Waele demuestra un comportamiento ascendente en función de la temperatura, lo que indica un acercamiento a un comportamiento newtoniano al aumentar la temperatura.
- El proceso de congelación de la murta influye sobre el comportamiento reológico de las pastas de murta. El índice de comportamiento es generalmente mayor en pastas descongeladas, pero la energía de activación es menor, indicando una menor variación de la viscosidad aparente con el alza de la temperatura de procesamiento.

6. RESUMEN

En el presente trabajo se caracterizó el comportamiento reológico de pastas de murta, *Ugni molinae* Turcz, procedente de la Décima Región de Chile, sector costero de Punucapa, comuna de Valdivia. Los ensayos se realizaron sobre muestras de 6 tipos de pasta de murta - pasta de murta entera, pulpa de murta y pulpa de murta azucarada al 15%, en estado fresco y descongelado, utilizando un viscosímetro con flujo de Couette (tipo *Brookfield*). Se obtuvieron datos de viscosidades a velocidades de rotación entre 1 y 200 rpm para temperaturas entre 30 y 90 °C. Por medio del método de conversión de Mitschka se determinaron los valores del esfuerzo de corte y de la relación de deformación respectiva, los cuales fueron utilizados para la construcción de modelos reológicos, tales como el modelo de Ostwald-de Waele o de la Ley de Potencia, el de Casson modificado y el de Herschel-Bulkley. Se demostró que los tres modelos son relevantes para describir el comportamiento reológico de la pasta de murta, aunque el modelo de Ostwald-de Waele es el que mejor se ajusta a los datos experimentales, describiendo así un comportamiento pseudoplástico. A una temperatura de 30 °C el índice de consistencia para la pasta de murta fresca entera con 102,02 Pa sⁿ es mayor que el de la pasta de murta entera descongelada con 93,858 Pa sⁿ. En el caso de la pulpa la muestra congelado con es valor de 41,823 Pa sⁿ es mayor que el de la pulpa de murta fresca con 30,415 Pa sⁿ. Estos valores disminuyeron con el alza de temperatura y se demostró que el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente puede ser descrito a través de ecuaciones del tipo Arrhenius. El índice de comportamiento reológico fluctúa alrededor de 0,20 con valores de 0,2353 para la pulpa descongelada azucarada y 0,1891 para la pasta de murta entera fresca. Se observó además que el proceso de congelamiento influye sobre el comportamiento reológico de las pastas, debido probablemente a un cambio estructural en la pasta. Por otra parte la viscosidad aparente de las pastas demuestra un quiebre en el comportamiento a temperatura de procesamiento sobre los 75 °C, lo que se atribuye a la gelificación de la pectina.

SUMMARY

In this present study the rheological behaviour of murta puré, *Ugni molinae* Turcz, was characterized. The samples used were from the Xth Region of Chile, from the coastal sector of Punucapa in Valdivia. The experiments were performed on 6 different types of puré – puré from whole murta, pulp of murta without and with 15 % sugar, all from fresh and thawed fruits, using a viscometer with Couette flow (*Brookfield* type). Viscosity data were obtained at velocities of rotation between 1 and 200 rpm and temperatures between 30 and 90 °C. Through the conversion method of Mitschka the corresponding values of stress and strain were determined, which thereafter were used to construct the rheological models, such as that of Ostwald-de Waele, also known as the Power Law model, the modified Casson model and the Herschel-Bulkley model. It was found that the three models are relevant for describing rheological behaviour of murta purés, however, the Ostwald-de Waele model was the best fit for the experimental data, showing a pseudoplastic behaviour. At a temperature of 30 °C the consistency index for puré from fresh murta with a value of 102.02 Pa sⁿ is higher than that of thawed murta puré with a value of 93.858 Pa sⁿ. In the case of murta pulp the thawed sample with a value of 41.823 Pa sⁿ is higher than that of the fresh fruit with a value of 30.415 Pa sⁿ. These values would fall as temperature rises, and it was demonstrated that the effect of temperature could be described using equations of the Arrhenius type. Rheological behaviour index fluctuates around 0.20 with a value of 0.2353 for a sweetened thawed pulp and a value of 0.1891 for a puré of fresh whole murta. It was also observed that the freezing process has an effect on the rheological behaviour of the purés, due probably to structural changes within the fruit puré. On the other hand the apparent viscosity of the puré shows a break in its behavioural course at process temperature above 75 °C, which was attributed to gelification of pectin.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALBA, M. 1977. Estudio sobre algunos aspectos de producción e industrialización de murta. Proyecto Desarrollo Sector Costa. Fondo Nacional Desarrollo Regional. Osorno, Chile. 30 p.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; IBARZ, A y PELEG, M. 1993. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión. Alimentaria. 241, 39-89.
- BARNES, A.H. 2001. An examination of the use of rotational viscometers for the quality control of non-newtonian liquid products in factories. Appl. Rheol. 11(2):82-101.
- BRIGGS, J.L. y STEFFE, J.F. 1997. Using Brookfield data and the Mitschka method to evaluate power law foods. J. Texture Studies 28: 517-522.
- BOURNE, M.C. 1982. Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. Academic Press, New York, 325 p.
- CARBONELL, E.; COSTELL, E y DURAN, L. 1990. Comportamiento reológico de los productos derivados de fruta. Flujo, dependencia del tiempo y plasticidad. Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment. 2, 189-209.
- CHARM, S.E. 1971. Fundamentals of food engineering. The AVI Pub. Co. Inc. Connecticut.
- CHARM, S.E. 1960. Viscosimetry of non-newtonian food materials. Food Research. 25, 351-362.
- CHEFTEL, J.C., CHEFTEL, H. Y BESANCON, P. 1983. Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos. Acribia, Zaragoza, pp. 47-80.
- CORNFORD, S.J., PARKINSON, T.L. y ROBB, J. 1969. Rheological characteristics of processed whole egg. J. Food Technol. 4, 353

- COSTELL, E.; CLEMENTE, G. y DURAN, L. 1982. Reología físico química del puré de albaricoque. II. Caracterización del flujo y relación entre los parámetros reológicos y las características químicas y físicas del producto. *Rev. Agroquím. Technol. Aliment.* 4, 539-550.
- COSTELL, E. y DURAN, L. 1978. Evaluación and cuantificación de la tixotropía del puré de albaricoque. *Rev. Agroquím. Technol. Aliment.* 18, 470-484.
- COULSON, J.M. y RICHARDSON, J.F. 1979. *Ingeniería química. Tomo I a VI. Ed. Reverté.*
- DODGE, D.W. y METZNER, A.B. 1959. Turbulent flow for non-Newtonians systems. *AIChE J.* 5 (2), 189-204.
- ERCAN, S.N. y DERVISOGLU, M. 1998. Study of the steady flow behavior of hazelnut paste. *J. Food Process Engineering* 21, 181-190.
- ESCHER, F.1983. Relevance of rheological data in food processing. In: JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTRÖM, B.; MEFFERT, H.F.Th.; SPIESS, W.E.L.; and VOS, G. (Eds.). *Physical Properties of foods. Applied Science Publishers, London and New York.* 425 p.
- FISZMAN, S.M.; COSTELL, E. y DURAN, L. 1984. Medida del comportamiento reológico de geles de pectina de alto metoxilo con un reómetro de cono-placa. Relación con la composición. *Rev. Agroquím. Technol. Aliment.* 2, 191-198.
- GALLEGOS, C; BERJANO, M.; GARCIA, F.P.; MUÑOZ, J. y FLORES, V. 1988. Destrucción estructural con la cizalla en mayonesas. En "Actas del VII Congreso Nacional de Química. Sevilla. Vol. III, 221-228.
- HAHN, S. J.; REE, T. y EYRING, H. 1959. Flow mechanism of thixotropic substances. *Ind. Eng. Chem.* 51, 856-857.
- HARPER, J.C. y EL-SHRIGI, A. F. 1965. Viscosimetric behaviour of tomato concentrates. *J. Food Sci.* 30, 470-476.

- HARPER, J.C. y LEBERMANN, K. W. 1962. Rheological behaviour of pear purees. Proc.1st Int. Congress Food Sci. Technol. 1, 719-728.
- HARTNETT, J.P. y HU, R.Y.Z. 1989. The yield stress an engineering reality. J. Rheol. 33, 671-679.
- HELDMAN, D.R. 1975. Food process engineering. The Avi Publishing Company, Inc. Connecticut.
- HEVIA, F.; VENEGAS, A.; WILCKENS, R.; ARAYA, F. y TAPIA, M. 1993. Murtilla (*Ugni molinae* Turcz). III. Algunas características del fruto colectado en Chile. Agro-Ciencias 9 (1): 63-66.
- HIGGS, S.J. y NORRINGTON, R.J. 1971. Rheological properties of selected foodstuffs. Process Biochem. 615, 52-54.
- HOLDSWORTH, S.D. 1971. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid foods products. J. Texture Stud. 2, 393-418.
- IBARZ, A. y BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. 1999. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania. USA. pp. 85-204.
- IBARZ, A., GONZÁLES, C., ESPULGAS, S. y VICENTE, M. 1992. Rheology of clarified fruit juice. I: Peach Juice. J. Food Eng. 15, 49-61
- IBARZ, A. y LOZANO, J.E. 1992. Nota. Caracterización reológica de pulpas concentradas de ciruela y melocotón. Rev. Agroquím. Technol. Aliment. 22, 539-549.
- IBARZ, A. y CASERO, T. 1987. Reología de zumos de manzana de diferente variedad. Alimentaria. Septiembre, 57-59.
- IBARZ, A y PAGAN, J. 1987a. Rheology of raspberry juices. J. Food Eng. 6, 269-289.
- IBARZ, A y PAGAN, J. 1987b. Consideraciones reológicas sobre zumo de frambuesa. Alimentación, equipos y tecnología. Mayo-junio, 175-182.

- JIMÉNEZ, L.; GARCIA, J. y FERRER, J.L. 1988. Dependencia del tiempo y de la temperatura en las constantes reológicas del zumo de tomate. *Afinidad*. 415, 239-242.
- KHALIL, K.E.; RAMAKRISHNA, P.; NANJUNDASWAMY, A.M. y PATWARDHAN, M.V. 1989. Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. *J. Food Eng.* 10, 231-240.
- KOKINI, J.L. 1992. Rheological properties of foods. En "Handbook of food engineering". Heldman, D. R. y Lund, D. B. Eds. Marcel Dekker. New York. pp. 1-38.
- KOKINI, J.L. y DICKIE, A. 1981. An attempt to identify and model transient viscoelastic flow in food. *J. Texture Stud.* 12, 539-557.
- LEVENSPIEL, O. 1993. Flujo de fluidos. Intercambio de calor. Ed. Reverté., Barcelona
- McCABE, W.L.; SMITH J.C. y HARRIOTT P. 1991. Operaciones unitarias en ingeniería química, Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A. Madrid.
- MITSCHKA, P. 1982. Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. *Rheol. Acta.* 21: 207-209.
- MIZRAHI, S. y BERK, Z. 1972. Flow behavior of concentrated orange juice: mathematical treatment. *J. Texture Stud.* 3, 69-79.
- MÜLLER, H.G. 1973. Introducción a la reología de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 174 p.
- NOVOA, R. 1982. Antecedentes sobre establecimiento y producción de frutos de la especie *Ugni molinae* Turcz. Tesis ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Chile. 90 p.
- ODIGBOH, E.V. y MOHSENIN, N.N. 1975b. Effects of concentration on the viscosity profile of cassava starch pastes during the cooking-cooling process. *J. Texture Stud.*, 5 441-457.

- PAREDES, M.D.C.; RAO, M.A. y BOURNE, M.C. 1988. Rheological characterization of salad dressing. 1. Steady shear, thixotropy and effect of temperature. *J. Texture Stud.* 19, 247-258.
- PERRY, R.H. y CHILTON, C.H. 1982. Manual del ingeniero químico. 2ª Edición. McGraw-Hill. México
- PRENTICE, J.H. 1968. Measurements of some flow properties of market cream. In *Rheology and Texture Foodstuffs*. SCI Monograph, No. 27, 265. Society of Chemical Industry, London.
- PRICE-JONES, J. 1953. The rheology of honey. In: "Foodstuffs, their plasticity, fluidity and consistency". Scott-Blair, G.W. Ed. Amsterdam. Holly.
- RAO, M.A. 1992. Transport and storage of food products. In: "Handbook of Food Engineering" Eds. D.R. Heldman y D.B. Lund. Marcel Dekker, Inc., New York
- RAO, M.A. y RIZVI, S.S.H. 1986. Engineering properties of foods. Ed. Marcel Dekker, inc., New York.
- RAO, M.A.; COOLEY, H.J. y VITALI, A.A. 1984. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. *Food Technol.* 38, 113-119.
- RAO, M.A.; BOURNE, M. C. y COOLEY, H. J. 1981. Flow properties of tomato concentrates. *J. Texture Stud.* 12, 521-528.
- RAO, M.A. 1977a. Rheology of liquid foods. A review. *J. Texture Stud.* 8, 135-168.
- RAO, M.A. 1977b. Measurement of flow properties of fluid foods. Developments, limitations, and interpretation of phenomena. *J. Texture Stud.* 8, 257-282.
- RAO, M.A. 1975. Measurements of flow properties of food suspensions with a mixer. *J. Texture Stud.* 6, 533-539.
- RAO, V.N.N.; HAMANN, D.D. y HUMPHRIES, E. G. 1975. *J. Texture Studies* 6, 197.
- RHA, CH. 1978. Rheology of fluid foods. *Food Technol.* 32(7): 77-82.

- SÁENS, C. y COSTELL, E. 1986. Comportamiento reológico de productos de limón. Influencia de la temperatura y de la concentración. Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment., 26 (4), 581-588.
- SARAVACOS, G.D. 1968. Tube viscometry of fruit juices and purees. J. Food Sci. 22, 1585-1588.
- SARAVACOS, G. D. 1970. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. J. Food Sci. 35, 122-125.
- SCALDO, A.M.; CICKERSON Jr. R.W.; PEELER, J.T. y READ Jr., R.B. 1970. The viscosity of egg and egg products. Food Technol. 24, 1301-1307.
- SCHWARTZ, M. y COSTELL, E. 1989. Influencia de la temperatura y de la concentración en la viscosidad de los zumos de manzana y de uva. Rev. Agroquím. Technol. Aliment.2, 239-245.
- SCOTT-BLAIR, G.W. 1966. The success of the Casson's equation. Rheol. Acta. 5, 184-187.
- SHERMAN, P. 1970. Industrial rheology. Academic Press. New York.
- SINGH, R.P. y HELDMAN, D. R. 1993. Introduction to Food Engineering. Academic Press. California.
- SKELLAND, A.P.H. 1967. Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. J. Wiley and Sons, Inc., New York.
- SPIESS, W.E.L. 1980. Impact of freezing rates on product quality of deep-frozen foods. Food process engineering. Vol. 1
- STEFFE, J.F. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd Ed. Freeman Press, East Lansing, Michigan State, USA. 418 p.
- STEFFE, J.F.; MOHAMED, I.O. y FORD, E.W. 1986. Rheological properties of fluid food. Data compilation. En "Physical and chemical properties of food". Okus, M.R. (Ed)., ASAE Publication.

- STEFFE, J.F. y MORGAN, R.G. 1986. Pipeline design and pump section for non-Newtonian fluid foods. *Food Technology*, 40 (12), 78-85
- STREETER, V.L. 1996. *Mecánica de fluidos*. México : McGraw Hill. 594 p.
- TIU, C. y BOGER, D.V. 1974. Complete rheological characterization of time-dependent food products. *J. Texture Stud.* 5, 329-338.
- TOLEDO, R.T. 1993. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Chapman and Hall. New York
- TUNG, M.A.; RICHARDS, J.F.; MORRISON, B.S. y WATSON, E.L. 1970. Rheology of fresh, aged and gamma-irradiated egg white. *J. Food Sci.* 35, 872-874.
- VITALI, A.A. y RAO, M.A. 1984. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration. *J. Food Sci.* 49, 882-888.
- VITALI, A.A. y RAO, M.A. 1982. Flow behaviour of guava puree as a function of temperature and concentration. *J. Texture Stud.* 13, 275-289.
- WATSON, E.L. 1968. Rheological behavior of apricot purees and concentrates. *Can. Agr. Eng.* 10, 1.
- WAZER, J.R. van; LYONS, J.W.; KIM, K.Y. y COLWELL, R.D. 1963. *Viscosity and flow measurements. A Laboratory Handbook of Rheology*. Interscience Publishers, New York
- WELTMANN, R.N. 1943. Breakdown of tixotropic structure as function of time. *Appl. Phys.* 14, 343-350.
- WILKINSON, W. L. 1960. *Non-Newtonian Liquids*. Ed. Pergamon Press, New York
- XU, S.J.; LEWIS, J.I y SHOEMAKER, C.F. 1984. A computerized system for the acquisition and analysis of time dependent flow data. *J. Texture Stud.* 15, 407-414.

ANEXOS

ANEXO 1

Ejemplo de calculo usando el método de MITSCHKA para obtener las constantes fundamentales reológica, y la viscosidad aparente

CUADRO A1.1 Resultados obtenidos de una pulpa de murta descongelada, para la obtención de las constante reológica fundamentales

pulpa de murta descongelada husillo R6 60° C					
Velocidad <i>N</i> rpm	VNE (cp)	Esfuerzo de corte σ (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente n^*	Relación de deformación $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Viscosidad aparente η (Pa s)
1,0	114800,0	26,98	0,67	0,331	81,518
1,5	100400,0	35,39	0,58	0,558	63,434
2,0	89700,0	42,16	0,51	0,812	51,930
2,5	78800,0	46,30	0,47	1,089	42,513
3,0	70000,0	49,35	0,43	1,387	35,584
4,0	58500,0	54,99	0,38	2,038	26,981
5,0	50400,0	59,22	0,34	2,755	21,493
6,0	45600,0	64,30	0,32	3,532	18,205
10,0	31500,0	74,03	0,25	7,139	10,369
12,0	28000,0	78,96	0,22	9,199	8,583
20,0	18500,0	86,95	0,17	18,768	4,633
30,0	13000,0	91,65	0,14	32,884	2,787
50,0	8300,0	97,53	0,11	64,802	1,505
60,0	7000,0	98,70	0,11	81,411	1,212
100,0	4400,0	103,40	0,10	145,368	0,711
200,0	2400,0	112,80	0,11	271,035	0,416

1) Transformación de las lecturas de VNE en números porcentuales de escala de torque (α) usando la ecuación 3-1, utilizando el factor de conversión correspondiente al husillo R6 (CUADRO 3)

$$\alpha_i = \frac{VNE}{FC} = \frac{114800}{10000 (N_i)^{-1}} = 11,48$$

2) Transformación de los valores de α , en esfuerzo de corte en Pa, utilizando la ecuación 3-2, con la constante $K_{\alpha\sigma}$ obtenida del CUADRO 4

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot K_{\alpha\sigma} = 11,48 \cdot 2,35 = 26,978 \text{ Pa}$$

3) Se grafica los datos obtenidos de N y σ , transformados a $\log \sigma - \log N$,

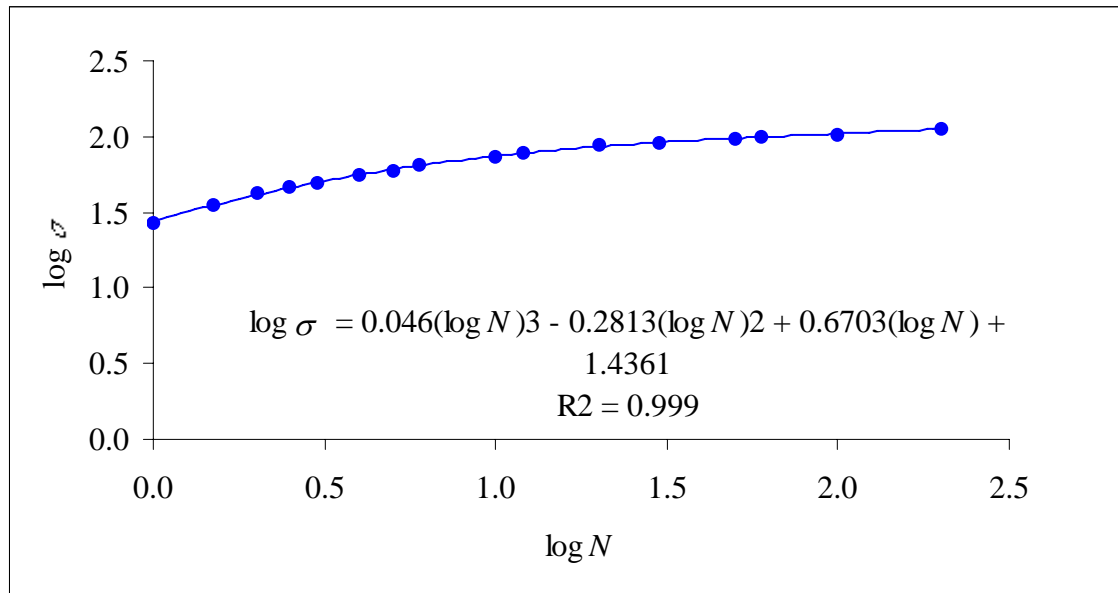


FIGURA A1.1 Grafica de interpolación polinomial de los pares $\log N - \log \sigma$

4) Por medio de una interpolación no lineal se encuentra la ecuación polinomial, con mejor coeficiente de correlación, y se procede a derivar la ecuación, obteniendo, el índice de comportamiento reológico aparente (n_i^*) para cada velocidad de rotación N_i

$$n_i^* = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log N)} = 0.138 \log N_i^2 - 0.5626 \log N_i + 0.6703 = 0,67$$

5) En la ecuación 3-4 se procede a reemplazar el n_i^* , y N_i para obtener la relación de deformación, $\dot{\gamma}$, para cada velocidad de rotación N

$$\dot{\gamma}_i = 0,2436(n_i^*)^{-0,766} \cdot N_i = 0,2436(0,67)^{-0,766} = 0,3311 \text{ s}^{-1}$$

6) Se grafica la relación de deformación – esfuerzo de corte, para obtener la ecuación de OSTWALD-DE-WAELE, HERSCHEL BULKLEY, CASSON y obtener las constantes reológicas fundamentales

7) Y final mente la viscosidad aparente es obtenida por medio de la ecuación 3-5

$$\eta_i = \frac{\sigma_i}{\dot{\gamma}_i} = \frac{26,98}{0,3311} = 81,51 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

ANEXO 2

Lecturas de la viscosidad newtoniana equivalente para 3 muestra de pulpa de murta descongelada

CUADRO A2.1 Lectura de la viscosidad Newtoniana de la muestra N° 1 en pulpa de murta durante 275 minutos, a diferentes rpm y una temperatura de 60° C

Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	Lecturas VNE (cp)			Promedio VNE
		rep. 1	rep. 2	rep. 3	
5	1,0	155400	118400	113000	128933
10	1,5	117200	94700	94100	102000
15	2,0	93500	77700	80700	83967
20	2,5	81400	68400	69600	73133
25	3,0	72500	62100	64400	66333
30	4,0	59100	51800	55200	55367
35	5,0	50700	45600	48400	48233
40	6,0	44800	40000	44200	43000
45	10	31100	28200	31600	30300
50	12	26900	25200	27500	26533
55	20	18100	16800	18700	17867
60	30	12700	11800	13500	12667
65	50	8100	7600	8600	8100
70	60	7000	6600	7400	7000
75	100	4500	4200	4700	4467
85	200	2500	2400	2500	2467
100	1,0	114800	100500	102800	106033
105	1,5	100400	87500	89700	92533
110	2,0	89700	81300	85500	85500
115	2,5	78800	71300	75700	75267
120	3,0	70000	65900	69100	68333
125	4,0	58500	54500	58300	57100
130	5,0	50400	46600	51300	49433
135	6,0	45600	41600	45500	44233
140	10	31500	30200	32500	31400
145	12	28000	26800	28900	27900
150	20	18500	17700	19700	18633
155	30	13000	12300	13900	13067
160	50	8300	7800	8800	8300
165	60	7000	6600	7400	7000
170	100	4400	4200	4600	4400
180	200	2400	2300	2500	2400
195	1,0	108900	90200	98000	99033
200	1,5	95300	81500	85100	87300
205	2,0	83000	74500	79200	78900
210	2,5	73400	67300	72100	70933
215	3,0	66300	60100	67200	64533
220	4,0	55500	50800	57300	54533
225	5,0	47300	44300	50100	47233
230	6,0	42600	39600	44800	42333
235	10	30300	28400	31600	30100
240	12	26400	25000	28200	26533
245	20	17800	17000	19300	18033
250	30	12400	12000	13300	12567
255	50	8000	7500	8500	8000
260	60	6700	6500	7200	6800
265	100	4300	4100	4500	4300
275	200	2400	2300	2500	2400

Continuación ANEXO 2

CUADRO A2.2 Lectura de la viscosidad Newtoniana de la muestra N° 2 en pulpa de murta durante 275 minutos a diferentes rpm a una temperatura de 60° C

Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	Lecturas (cp)			Promedio VNE
		rep. 1	rep. 2	rep. 3	
5	1,0	78300	100300	94700	91100
10	1,5	64000	81600	72700	72767
15	2,0	61200	67700	60200	63033
20	2,5	49500	59600	51400	53500
25	3,0	45100	52900	47600	48533
30	4,0	37300	42700	41200	40400
35	5,0	32000	36200	38000	35400
40	6,0	28000	33100	34100	31733
45	10	20200	23600	24600	22800
50	12	17500	20800	22100	20133
55	20	11600	14400	14700	13567
60	30	8300	10100	10400	9600
65	50	5400	6600	6800	6267
70	60	4600	5800	5900	5433
75	100	3000	3700	3700	3467
85	200	1800	2100	2100	2000
100	1,0	69100	83200	83100	78467
105	1,5	63600	73300	75700	70867
110	2,0	55700	71900	68400	65333
115	2,5	48200	64300	62000	58167
120	3,0	42900	57900	56300	52367
125	4,0	36200	48200	47000	43800
130	5,0	31300	41500	41300	38033
135	6,0	28100	37400	35900	33800
140	10	19900	26600	25400	23967
145	12	17500	23200	22600	21100
150	20	11700	15200	15300	14067
155	30	8400	11000	10800	10067
160	50	5400	6900	6800	6367
165	60	4600	5900	5700	5400
170	100	3000	3700	3600	3433
180	200	1700	2000	2000	1900
195	1,0	66300	82100	78500	75633
200	1,5	60000	74800	71500	68767
205	2,0	51600	68100	65400	61700
210	2,5	44300	59600	59000	54300
215	3,0	39500	55700	52900	49367
220	4,0	33200	46900	44900	41667
225	5,0	28600	40600	38700	35967
230	6,0	25500	35700	34600	31933
235	10	18300	24900	24600	22600
240	12	15900	22700	21500	20033
245	20	10900	15100	14500	13500
250	30	7800	10600	10200	9533
255	50	5100	6700	6500	6100
260	60	4400	5700	5500	5200
265	100	2900	3600	3500	3333
275	200	1600	2000	1900	1833

Continuación del ANEXO 2

CUADRO A2.3 Lectura de la viscosidad Newtoniana de la muestra N° 3 en pulpa de murta durante 275 minutos a diferentes rpm a una temperatura de 60° C

Tiempo (min)	Velocidad (rpm)	Lecturas (cp)			Promedio VNE
		rep. 1	rep. 2	rep. 3	
5	1,0	114100	101200	86900	100733
10	1,5	91800	81500	68700	80667
15	2,0	78400	68200	57700	68100
20	2,5	67200	59200	49800	58733
25	3,0	58800	52200	44600	51867
30	4,0	50200	43600	39700	44500
35	5,0	43600	39000	34200	38933
40	6,0	38000	34400	32000	34800
45	10	26600	24100	23100	24600
50	12	23100	21300	20500	21633
55	20	15000	14400	13800	14400
60	30	10700	10500	9700	10300
65	50	6900	6900	6400	6733
70	60	5900	5900	5600	5800
75	100	3800	3800	3700	3767
85	200	2100	2100	2000	2067
100	1,0	92400	81400	79800	84533
105	1,5	82500	71100	71300	74967
110	2,0	76900	69600	65000	70500
115	2,5	69300	63600	60000	64300
120	3,0	62100	56300	54200	57533
125	4,0	52200	47900	45000	48367
130	5,0	45300	41400	38800	41833
135	6,0	40800	37000	35200	37667
140	10	28500	26300	24800	26533
145	12	24800	23200	22100	23367
150	20	16300	15800	14600	15567
155	30	11400	11000	10300	10900
160	50	7200	7000	6800	7000
165	60	5900	5800	5700	5800
170	100	3700	3700	3600	3667
180	200	2100	2000	2000	2033
195	1,0	90200	80700	78000	82967
200	1,5	80200	69800	67000	72333
205	2,0	73300	65800	62500	67200
210	2,5	63400	61200	56200	60267
215	3,0	59300	55300	50500	55033
220	4,0	49500	47200	43000	46567
225	5,0	42000	40200	36800	39667
230	6,0	38200	35400	33500	35700
235	10	26600	25500	23700	25267
240	12	23600	22700	21100	22467
245	20	15600	15400	13900	14967
250	30	11000	10600	9900	10500
255	50	7000	6800	6600	6800
260	60	5800	5700	5600	5700
265	100	3700	3600	3500	3600
275	200	2000	2000	2000	2000

ANEXO 3. Resultados de las constantes reológicas fundamentales para tres tipo de muestras de pulpa de murta descongelada

Tiempo (min)	Velocidad N (rpm)	Muestra N° 1			Muestra N° 2			Muestra N° 3		
		σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	η (Pa s)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	η (Pa s)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s^{-1})	η (Pa s)
5	1,0	30,3	0,43	71,23	21,41	0,40	53,58	23,67	0,41	57,25
10	1,5	35,96	0,68	52,58	25,65	0,65	39,64	28,44	0,67	42,73
15	2,0	39,46	0,96	41,12	29,63	0,91	32,46	32,01	0,93	34,25
20	2,5	42,97	1,25	34,38	31,43	1,19	26,35	34,51	1,22	28,34
25	3,0	46,77	1,55	30,13	34,22	1,49	23,04	36,57	1,51	24,18
30	4,0	52,04	2,19	23,77	37,98	2,10	18,07	41,83	2,13	19,61
35	5,0	56,67	2,86	19,79	41,6	2,75	15,11	45,75	2,79	16,40
40	6,0	60,63	3,57	16,99	44,74	3,44	13,02	49,07	3,47	14,12
45	10	71,21	6,66	10,69	53,58	6,40	8,37	57,81	6,46	8,94
50	12	74,82	8,34	8,97	56,78	8,01	7,09	61,01	8,08	7,55
55	20	83,97	15,78	5,32	63,76	14,98	4,26	67,68	15,19	4,45
60	30	89,3	26,43	3,38	67,68	24,65	2,75	72,62	25,23	2,88
65	50	95,18	51,38	1,85	73,63	46,10	1,60	79,12	48,23	1,64
70	60	98,7	65,45	1,51	76,61	57,58	1,33	81,78	60,94	1,34
75	100	104,97	131,21	0,80	81,47	106,75	0,76	88,52	118,21	0,75
85	200	115,93	356,76	0,32	94	241,03	0,39	97,13	296,11	0,33
100	1,0	24,92	0,31	80,30	18,44	0,30	61,63	19,86	0,29	69,42
105	1,5	32,62	0,52	62,27	24,98	0,51	49,04	26,43	0,49	53,95
110	2,0	40,19	0,76	52,65	30,71	0,75	41,10	33,14	0,72	45,93
115	2,5	44,22	1,03	43,14	34,17	1,01	33,88	37,78	0,98	38,63
120	3,0	48,18	1,31	36,86	36,92	1,29	28,59	40,56	1,26	32,27
125	4,0	53,67	1,92	27,88	41,17	1,92	21,50	45,46	1,88	24,22
130	5,0	58,08	2,61	22,27	44,69	2,61	17,13	49,15	2,57	19,11
135	6,0	62,37	3,35	18,62	47,66	3,36	14,17	53,11	3,34	15,92
140	10	73,79	6,82	10,82	56,32	6,92	8,14	62,35	7,00	8,91
145	12	78,68	8,82	8,92	59,5	8,96	6,64	65,89	9,15	7,20
150	20	87,58	18,24	4,80	66,11	18,44	3,59	73,16	19,39	3,77
155	30	92,12	32,43	2,84	70,97	32,11	2,21	76,85	34,68	2,22
160	50	97,53	65,41	1,49	74,81	61,06	1,23	82,25	67,66	1,22
165	60	98,7	82,90	1,19	76,14	75,03	1,01	81,78	83,47	0,98
170	100	103,4	151,12	0,68	80,68	123,44	0,65	86,17	135,92	0,63
180	200	112,8	283,49	0,40	89,3	206,00	0,43	95,57	216,44	0,44
195	1,0	23,27	0,30	76,87	17,77	0,31	57,39	19,5	0,30	65,44
200	1,5	30,77	0,51	60,06	24,24	0,52	46,27	25,5	0,51	50,39
205	2,0	37,08	0,75	49,60	29	0,76	37,94	31,58	0,74	42,65
210	2,5	41,67	1,01	41,45	31,9	1,03	31,06	35,41	1,00	35,48
215	3,0	45,5	1,28	35,46	34,8	1,31	26,57	38,8	1,28	30,40
220	4,0	51,26	1,89	27,10	39,17	1,93	20,30	43,77	1,89	23,18
225	5,0	55,5	2,56	21,64	42,26	2,61	16,18	46,61	2,57	18,15
230	6,0	59,69	3,29	18,12	45,03	3,35	13,44	50,34	3,31	15,22
235	10	70,74	6,70	10,56	53,11	6,77	7,84	59,38	6,78	8,76
240	12	74,82	8,64	8,66	56,49	8,71	56,49	63,36	8,78	7,22
245	20	84,76	17,67	4,80	63,45	17,60	63,45	70,34	18,10	3,89
250	30	88,6	30,87	2,87	67,21	30,30	67,21	74,03	31,75	2,33
255	50	94	59,93	1,57	71,68	57,46	71,68	79,9	61,51	1,30
260	60	95,88	74,62	1,28	73,32	70,90	73,32	80,37	76,30	1,05
265	100	101,05	128,81	0,78	78,33	119,80	78,33	84,6	129,25	0,65
275	200	112,8	228,98	0,49	86,17	210,66	86,17	94	222,16	0,42

ANEXO 4. Datos reológicos para la pasta de murta fresca

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	371150	87,22	0,3324	0,57	154,00
	1,5	276400	97,43	0,2881	0,95	102,78
	2,0	222250	104,46	0,2596	1,37	76,32
	2,5	190700	112,04	0,2393	1,82	61,52
	3,0	169200	119,29	0,2238	2,30	51,86
	4,0	132100	124,17	0,2014	3,33	37,34
	5,0	111550	131,07	0,1857	4,42	29,64
	6,0	93950	132,47	0,1741	5,58	23,75
	10	63200	148,52	0,1467	10,60	14,02
	12	51550	145,37	0,1388	13,26	10,96
	20	34300	161,21	0,1222	24,38	6,61
	30	24050	169,55	0,1146	38,42	4,41
	50	15000	176,25	0,1120	65,14	2,71
	60	12850	181,19	0,1130	77,64	2,33
100	8100	190,35	0,1212	122,66	1,55	
200	4500	211,50	0,1449	213,96	0,99	
45	1,0	322100	75,69	0,3054	0,60	125,25
	1,5	239450	84,41	0,2688	1,00	84,43
	2,0	192650	90,55	0,2455	1,43	63,38
	2,5	160000	94,00	0,2290	1,88	49,91
	3,0	136750	96,41	0,2166	2,36	40,88
	4,0	109000	102,46	0,1989	3,36	30,52
	5,0	94550	111,10	0,1867	4,41	25,22
	6,0	81800	115,34	0,1778	5,49	21,01
	10	53600	125,96	0,1576	10,03	12,56
	12	45600	128,59	0,1522	12,37	10,40
	20	29900	140,53	0,1418	21,76	6,46
	30	20650	145,58	0,1387	33,19	4,39
	50	13050	153,34	0,1412	54,55	2,81
	60	11200	157,92	0,1439	64,54	2,45
100	7200	169,20	0,1562	101,00	1,68	
200	4200	197,40	0,1844	177,85	1,11	
60	1,0	173450	40,76	0,4721	0,43	94,16
	1,5	133400	47,02	0,4202	0,71	66,24
	2,0	113450	53,32	0,3862	1,01	52,81
	2,5	97000	56,99	0,3614	1,33	42,91
	3,0	88900	62,67	0,3421	1,66	37,71
	4,0	72350	68,01	0,3136	2,37	28,71
	5,0	63100	74,14	0,2930	3,12	23,77
	6,0	54750	77,20	0,2772	3,91	19,77
	10	37000	86,95	0,2379	7,32	11,88
	12	32500	91,65	0,2256	9,15	10,02
	20	22100	103,87	0,1961	16,97	6,12
	30	15500	109,28	0,1777	27,44	3,98
	50	9750	114,56	0,1611	49,31	2,32
	60	8350	117,74	0,1569	60,38	1,95
100	5550	130,43	0,1501	104,13	1,25	
200	3000	141,00	0,1523	205,91	0,68	

Continuación del ANEXO 4

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1,0	159200	37,41	0,5498	0,39	97,12
	1,5	114700	40,43	0,4739	0,65	62,45
	2,0	104200	48,97	0,4249	0,94	52,19
	2,5	91600	53,82	0,3896	1,25	42,93
	3,0	82200	57,95	0,3626	1,59	36,46
	4,0	69900	65,71	0,3232	2,31	28,38
	5,0	59650	70,09	0,2953	3,10	22,61
	6,0	52600	74,17	0,2743	3,94	18,84
	10	35500	83,43	0,2241	7,66	10,89
	12	30100	84,88	0,2092	9,69	8,76
	20	19700	92,59	0,1760	18,44	5,02
	30	14350	101,17	0,1586	29,95	3,38
	50	9200	108,10	0,1479	52,67	2,05
	60	7950	112,10	0,1471	63,46	1,77
100	5150	121,03	0,1534	102,41	1,18	
200	2900	136,30	0,1821	179,64	0,76	
90	1,0	96850	22,76	0,6323	0,35	65,77
	1,5	82100	28,94	0,5645	0,57	51,11
	2,0	73750	34,66	0,5195	0,80	43,08
	2,5	67150	39,45	0,4864	1,06	37,30
	3,0	60650	42,76	0,4605	1,32	32,31
	4,0	48850	45,92	0,4218	1,89	24,33
	5,0	41900	49,23	0,3936	2,49	19,79
	6,0	37800	53,30	0,3717	3,12	17,09
	10	28250	66,39	0,3159	5,89	11,27
	12	25150	70,92	0,2980	7,39	9,60
	20	17800	83,66	0,2533	13,95	6,00
	30	13100	92,36	0,2237	23,01	4,01
	50	8300	97,52	0,1938	42,81	2,28
	60	7000	98,70	0,1851	53,21	1,85
100	4600	108,10	0,1663	96,27	1,12	
200	2700	126,90	0,1539	204,28	0,62	

ANEXO 5. Datos reológicos para la pulpa de murta fresca

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	119900	28,18	0,2414	0,72	38,94
	1,5	87300	30,77	0,2331	1,11	27,60
	2,0	70150	32,97	0,2277	1,51	21,78
	2,5	59200	34,78	0,2237	1,92	18,14
	3,0	50950	35,92	0,2207	2,33	15,45
	4,0	40800	38,35	0,2162	3,15	12,18
	5,0	33850	39,77	0,2130	3,98	9,99
	6,0	29350	41,38	0,2106	4,82	8,59
	10	20350	47,82	0,2046	8,21	5,82
	12	17250	48,65	0,2028	9,92	4,90
	20	11500	54,05	0,1985	16,81	3,21
	30	8250	58,16	0,1959	25,47	2,28
	50	5450	64,04	0,1938	42,80	1,50
	60	4650	65,57	0,1934	51,45	1,27
100	3100	72,85	0,1930	85,89	0,85	
200	1800	84,60	0,1944	170,80	0,50	
45	1,0	107300	25,22	0,2414	0,72	34,85
	1,5	80550	28,39	0,2331	1,11	25,47
	2,0	64100	30,13	0,2277	1,51	19,90
	2,5	54350	31,93	0,2237	1,92	16,65
	3,0	46950	33,10	0,2207	2,33	14,24
	4,0	38100	35,81	0,2162	3,15	11,37
	5,0	31850	37,42	0,2130	3,98	9,40
	6,0	27300	38,49	0,2106	4,82	7,99
	10	18750	44,06	0,2046	8,21	5,36
	12	15750	44,42	0,2028	9,92	4,48
	20	10400	48,88	0,1985	16,81	2,91
	30	7550	53,23	0,1959	25,47	2,09
	50	4950	58,16	0,1938	42,80	1,36
	60	4250	59,93	0,1934	51,45	1,16
100	2800	65,80	0,1930	85,89	0,77	
200	1700	79,90	0,1944	170,80	0,47	
60	1,0	88450	20,79	0,3333	0,57	36,78
	1,5	67200	23,69	0,3049	0,91	26,10
	2,0	55050	25,87	0,2864	1,27	20,38
	2,5	46150	27,11	0,2730	1,65	16,47
	3,0	39800	28,06	0,2627	2,03	13,79
	4,0	32550	30,60	0,2476	2,84	10,78
	5,0	27650	32,49	0,2369	3,67	8,85
	6,0	24150	34,05	0,2287	4,52	7,53
	10	16650	39,13	0,2089	8,08	4,84
	12	13950	39,34	0,2029	9,92	3,97
	20	9500	44,65	0,1891	17,45	2,56
	30	6550	46,18	0,1813	27,04	1,71
	50	4350	51,11	0,1754	46,21	1,11
	60	3700	52,17	0,1744	55,70	0,94
100	2500	58,75	0,1745	92,78	0,63	
200	1400	65,80	0,1818	179,85	0,37	

Continuación del ANEXO 5

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1	66850	15,71	0,5743	0,37	42,17
	1,5	54600	19,25	0,4830	0,64	30,16
	2	47950	22,54	0,4249	0,94	24,01
	2,5	42550	25,00	0,3837	1,27	19,71
	3	37650	26,54	0,3525	1,62	16,34
	4	30700	28,86	0,3078	2,40	12,01
	5	25600	30,08	0,2769	3,26	9,24
	6	22200	31,30	0,2542	4,17	7,50
	10	15300	35,96	0,2024	8,28	4,34
	12	13050	36,80	0,1882	10,51	3,50
	20	8900	41,83	0,1601	19,82	2,11
	30	6200	43,71	0,1503	31,20	1,40
	50	4000	47,00	0,1537	51,12	0,92
	60	3400	47,94	0,1592	59,73	0,80
100	2250	52,88	0,1863	88,25	0,60	
200	1300	61,10	0,2511	140,41	0,44	
90	1	64250	15,10	0,4936	0,42	36,09
	1,5	50100	17,66	0,4423	0,68	25,87
	2	41150	19,34	0,4082	0,97	19,98
	2,5	36050	21,18	0,3830	1,27	16,67
	3	33500	23,62	0,3632	1,59	14,88
	4	28500	26,79	0,3335	2,26	11,86
	5	24100	28,32	0,3118	2,97	9,52
	6	21200	29,89	0,2949	3,72	8,03
	10	14250	33,49	0,2514	7,01	4,77
	12	12350	34,83	0,2373	8,80	3,96
	20	8650	40,66	0,2018	16,60	2,45
	30	6100	43,01	0,1777	27,45	1,57
	50	4000	47,00	0,1526	51,40	0,91
	60	2500	46,53	0,1451	64,11	0,73
100	2150	50,53	0,1280	117,64	0,43	
200	1200	56,40	0,1141	256,91	0,22	

ANEXO 6. Datos reológicos para la murta fresca con un 15% de azúcar

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	142500	33,49	0,1728	0,93	35,82
	1,5	104300	36,77	0,1690	1,43	25,78
	2,0	83350	39,17	0,1664	1,92	20,36
	2,5	69400	40,77	0,1645	2,43	16,80
	3,0	55950	39,44	0,1630	2,93	13,45
	4,0	45750	43,01	0,1607	3,95	10,88
	5,0	38100	44,77	0,1590	4,98	8,99
	6,0	32900	46,39	0,1577	6,02	7,71
	10	22550	52,99	0,1542	10,20	5,20
	12	19050	53,72	0,1530	12,31	4,36
	20	12850	60,40	0,1500	20,84	2,90
	30	9300	65,57	0,1479	31,60	2,07
	50	6200	72,85	0,1455	53,33	1,37
	60	5300	74,73	0,1447	64,25	1,16
100	3550	83,43	0,1428	108,18	0,77	
200	2150	101,05	0,1408	218,74	0,46	
45	1,0	132500	31,14	0,2150	0,79	39,38
	1,5	96850	34,14	0,2071	1,22	27,97
	2,0	76600	36,00	0,2026	1,66	21,75
	2,5	64050	37,63	0,1996	2,09	17,99
	3,0	55350	39,02	0,1977	2,53	15,42
	4,0	44250	41,60	0,1952	3,41	12,21
	5,0	36900	43,36	0,1940	4,28	10,13
	6,0	31900	44,98	0,1933	5,15	8,74
	10	21000	49,35	0,1934	8,58	5,75
	12	17900	50,48	0,1941	10,26	4,92
	20	11950	56,17	0,1979	16,85	3,33
	30	8800	62,04	0,2030	24,79	2,50
	50	5900	69,33	0,2118	39,99	1,73
	60	5000	70,50	0,2156	47,34	1,49
100	3350	78,73	0,2282	75,55	1,04	
200	2000	94,00	0,2497	141,01	0,67	
60	1,0	108850	25,58	0,2587	0,69	37,28
	1,5	80700	28,45	0,2394	1,09	26,04
	2,0	63650	29,92	0,2277	1,51	19,76
	2,5	53550	31,46	0,2197	1,94	16,18
	3,0	46450	32,75	0,2139	2,38	13,75
	4,0	37300	35,06	0,2062	3,27	10,74
	5,0	31450	36,95	0,2013	4,16	8,89
	6,0	27100	38,21	0,1981	5,05	7,56
	10	18350	43,12	0,1925	8,61	5,01
	12	15400	43,43	0,1918	10,36	4,19
	20	10000	47,00	0,1933	17,16	2,74
	30	7300	51,47	0,1981	25,25	2,04
	50	5000	58,75	0,2089	40,41	1,45
	60	4250	59,93	0,2140	47,61	1,26
100	2850	66,98	0,2319	74,62	0,90	
200	1700	79,90	0,2644	134,96	0,59	

Continuación del ANEXO 6

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Lectura (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1	70050	16,46	0,4610	0,44	37,34
	1,5	54050	19,05	0,4024	0,73	25,96
	2	45150	21,22	0,3648	1,05	20,12
	2,5	40000	23,50	0,3379	1,40	16,81
	3	35250	24,85	0,3173	1,76	14,11
	4	28650	26,93	0,2875	2,53	10,64
	5	24650	28,96	0,2667	3,35	8,64
	6	21200	29,89	0,2511	4,21	7,10
	10	14950	35,13	0,2144	7,92	4,43
	12	12350	34,83	0,2038	9,89	3,52
	20	8150	38,31	0,1811	18,04	2,12
	30	5900	41,60	0,1703	28,36	1,47
	50	3950	46,41	0,1660	48,20	0,96
	60	3300	46,53	0,1670	57,58	0,81
	100	2150	50,53	0,1766	91,94	0,55
200	1250	58,75	0,2061	163,35	0,36	
90	1	61350	14,42	0,4610	0,44	32,70
	1,5	41500	14,63	0,4024	0,73	19,94
	2	34050	16,00	0,3648	1,05	15,17
	2,5	33050	19,42	0,3379	1,40	13,89
	3	29200	20,59	0,3173	1,76	11,69
	4	23950	22,51	0,2875	2,53	8,89
	5	21200	24,91	0,2667	3,35	7,43
	6	18500	26,09	0,2511	4,21	6,19
	10	13000	30,55	0,2144	7,92	3,86
	12	11050	31,16	0,2038	9,89	3,15
	20	7650	35,96	0,1811	18,04	1,99
	30	5500	38,78	0,1703	28,36	1,37
	50	3650	42,89	0,1660	48,20	0,89
	60	3000	42,30	0,1670	57,58	0,73
	100	2000	47,00	0,1766	91,94	0,51
200	1100	51,70	0,2061	163,35	0,32	

ANEXO 7. Datos reológicos para la pasta murta descongelada

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	359000	84,37	0,2737	0,657	128,36
	1,5	270200	95,25	0,2401	1,090	87,40
	2,0	216433	101,72	0,2191	1,559	65,25
	2,5	182367	107,14	0,2043	2,056	52,12
	3,0	156000	109,98	0,1933	2,574	42,73
	4,0	122200	114,87	0,1778	3,659	31,39
	5,0	101067	118,75	0,1673	4,791	24,79
	6,0	87000	122,67	0,1598	5,956	20,60
	10	58367	137,16	0,1436	10,772	12,73
	12	48100	135,64	0,1396	13,211	10,27
	20	31167	146,48	0,1332	22,818	6,42
	30	22100	155,81	0,1333	34,207	4,55
	50	14400	169,20	0,1399	54,934	3,08
	60	12200	172,02	0,1441	64,473	2,67
100	7733	181,73	0,1605	98,920	1,84	
200	4467	209,95	0,1944	170,848	1,23	
45	1,0	280867	66,00	0,2986	0,61	107,35
	1,5	211733	74,64	0,2757	0,98	76,13
	2,0	171033	80,39	0,2607	1,36	58,91
	2,5	142733	83,86	0,2497	1,76	47,56
	3,0	125733	88,64	0,2411	2,17	40,79
	4,0	100467	94,44	0,2284	3,02	31,27
	5,0	85133	100,03	0,2192	3,90	25,68
	6,0	74233	104,67	0,2121	4,79	21,84
	10	49067	115,31	0,1944	8,54	13,50
	12	41967	118,35	0,1888	10,48	11,29
	20	27833	130,82	0,1753	18,50	7,07
	30	20033	141,23	0,1667	28,83	4,90
	50	13033	153,14	0,1586	49,91	3,07
	60	11100	156,51	0,1565	60,51	2,59
100	7133	167,63	0,1526	102,82	1,63	
200	4033	189,55	0,1522	206,01	0,92	
60	1,0	210900	49,56	0,3621	0,53	93,44
	1,5	163467	57,62	0,3287	0,86	67,24
	2,0	135633	63,75	0,3070	1,20	52,95
	2,5	114133	67,05	0,2913	1,57	42,80
	3,0	100167	70,62	0,2793	1,94	36,37
	4,0	80167	75,36	0,2616	2,72	27,69
	5,0	67767	79,63	0,2491	3,53	22,54
	6,0	59667	84,13	0,2396	4,37	19,27
	10	41500	97,52	0,2167	7,86	12,41
	12	34967	98,61	0,2098	9,67	10,20
	20	23467	110,29	0,1941	17,10	6,45
	30	16600	117,03	0,1854	26,57	4,40
	50	11133	130,81	0,1792	45,46	2,88
	60	9500	133,95	0,1783	54,76	2,45
100	6167	144,92	0,1793	90,87	1,59	
200	3567	167,65	0,1892	174,42	0,96	

Continuación del ANEXO 7

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Lectura (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1,0	175433	41,23	0,4625	0,44	93,75
	1,5	141633	49,93	0,4069	0,73	68,61
	2,0	120900	56,82	0,3708	1,04	54,55
	2,5	104533	61,41	0,3449	1,38	44,62
	3,0	91533	64,53	0,3249	1,73	37,32
	4,0	75067	70,56	0,2958	2,48	28,48
	5,0	64067	75,28	0,2751	3,27	23,00
	6,0	55033	77,60	0,2596	4,11	18,89
	10	36833	86,56	0,2220	7,72	11,22
	12	32600	91,93	0,2108	9,63	9,54
	20	21733	102,15	0,1854	17,71	5,77
	30	15700	110,69	0,1717	28,18	3,93
	50	10333	121,41	0,1626	48,98	2,48
	60	8833	124,55	0,1615	59,08	2,11
	100	5667	133,17	0,1645	97,07	1,37
200	3200	150,40	0,1830	178,90	0,84	
90	1,0	139300	32,74	0,4985	0,42	78,84
	1,5	99133	34,94	0,4748	0,65	54,05
	2,0	86967	40,87	0,4589	0,88	46,20
	2,5	83900	49,29	0,4472	1,13	43,69
	3,0	75567	53,27	0,4379	1,38	38,73
	4,0	62133	58,41	0,4240	1,88	31,07
	5,0	53567	62,94	0,4138	2,39	26,29
	6,0	48333	68,15	0,4058	2,92	23,37
	10	34733	81,62	0,3852	5,06	16,13
	12	31533	88,92	0,3785	6,15	14,45
	20	21533	101,21	0,3613	10,63	9,52
	30	15533	109,51	0,3495	16,35	6,70
	50	10400	122,20	0,3370	28,02	4,36
	60	8967	126,43	0,3331	33,92	3,73
	100	6000	141,00	0,3241	57,74	2,44
200	3100	145,70	0,3159	117,77	1,24	

ANEXO 8. Datos reológicos para la pulpa de murta descongelada

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	118633	27,88	0,5666	0,38	74,06
	1,5	104333	36,78	0,4880	0,63	58,09
	2,0	89233	41,94	0,4379	0,92	45,73
	2,5	78133	45,90	0,4023	1,22	37,52
	3,0	69633	49,09	0,3753	1,55	31,71
	4,0	57033	53,61	0,3365	2,24	23,89
	5,0	48467	56,95	0,3097	2,99	19,05
	6,0	42367	59,74	0,2899	3,77	15,83
	10	29367	69,01	0,2445	7,17	9,63
	12	24967	70,41	0,2319	8,95	7,86
	20	17133	80,53	0,2066	16,30	4,94
	30	12600	88,83	0,1972	25,35	3,50
	50	8500	99,88	0,1986	42,02	2,38
	60	7167	101,05	0,2027	49,64	2,04
100	4900	115,15	0,2242	76,58	1,50	
200	2800	131,60	0,2772	130,18	1,01	
45	1,0	106900	25,12	0,5455	0,39	64,83
	1,5	91500	32,25	0,4705	0,65	49,54
	2,0	78433	36,86	0,4227	0,94	39,12
	2,5	68300	40,13	0,3887	1,26	31,95
	3,0	60733	42,82	0,3629	1,59	26,95
	4,0	49667	46,69	0,3259	2,30	20,30
	5,0	42433	49,86	0,3003	3,06	16,29
	6,0	36967	52,12	0,2814	3,86	13,50
	10	25700	60,40	0,2381	7,31	8,26
	12	21600	60,91	0,2261	9,13	6,67
	20	14800	69,56	0,2020	16,59	4,19
	30	10867	76,61	0,1929	25,78	2,97
	50	7233	84,99	0,1942	42,73	1,99
	60	6200	87,42	0,1981	50,51	1,73
100	4167	97,92	0,2187	78,05	1,25	
200	2400	112,80	0,2693	133,11	0,85	
60	1,0	89133	20,95	0,6327	0,35	60,55
	1,5	80200	28,27	0,5354	0,59	47,94
	2,0	68833	32,35	0,4734	0,86	37,45
	2,5	60867	35,76	0,4293	1,16	30,73
	3,0	54700	38,56	0,3959	1,49	25,95
	4,0	44700	42,02	0,3480	2,19	19,21
	5,0	38133	44,81	0,3148	2,95	15,18
	6,0	33500	47,24	0,2903	3,77	12,53
	10	23400	54,99	0,2342	7,41	7,43
	12	19667	55,46	0,2186	9,37	5,92
	20	13367	62,82	0,1874	17,57	3,58
	30	9767	68,86	0,1758	27,68	2,49
	50	6400	75,20	0,1776	45,77	1,64
	60	5467	77,08	0,1827	53,74	1,43
100	3700	86,95	0,2095	80,66	1,08	
200	2100	98,70	0,2753	130,88	0,75	

Continuación del ANEXO 8

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1,0	87600	20,59	0,5081	0,41	50,31
	1,5	74567	26,28	0,4455	0,68	38,72
	2,0	62533	29,39	0,4051	0,97	30,19
	2,5	53900	31,67	0,3760	1,29	24,58
	3,0	48033	33,86	0,3537	1,62	20,90
	4,0	38900	36,57	0,3211	2,33	15,72
	5,0	33400	39,25	0,2981	3,08	12,75
	6,0	29400	41,45	0,2808	3,87	10,72
	10	20467	48,10	0,2393	7,28	6,60
	12	17600	49,63	0,2270	9,10	5,45
	20	12000	56,40	0,1995	16,75	3,37
	30	8600	60,63	0,1851	26,61	2,28
	50	5567	65,41	0,1761	46,07	1,42
	60	4800	67,68	0,1754	55,45	1,22
100	3200	75,20	0,1805	90,41	0,83	
200	1800	84,60	0,2039	164,69	0,51	
90	1,0	64900	15,25	0,4483	0,45	33,86
	1,5	47267	16,66	0,4307	0,70	23,92
	2,0	43767	20,57	0,4173	0,95	21,62
	2,5	37967	22,31	0,4063	1,21	18,37
	3,0	32600	22,98	0,3970	1,48	15,50
	4,0	28033	26,35	0,3816	2,04	12,93
	5,0	24933	29,30	0,3692	2,61	11,21
	6,0	22267	31,40	0,3586	3,21	9,79
	10	15567	36,58	0,3273	5,73	6,38
	12	13600	38,35	0,3155	7,07	5,42
	20	9467	44,49	0,2808	12,89	3,45
	30	7133	50,29	0,2514	21,04	2,39
	50	4967	58,36	0,2121	39,95	1,46
	60	4133	58,28	0,1974	50,64	1,15
100	2700	63,45	0,1547	101,75	0,62	
200	1500	70,50	0,0926	301,40	0,23	

ANEXO 9. Datos reológicos para la pulpa de murta descongelada con un 15% de azúcar

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
30	1,0	110233	25,90	0,5975	0,36	71,68
	1,5	97133	34,24	0,5134	0,61	56,23
	2,0	83633	39,31	0,4599	0,88	44,50
	2,5	74567	43,81	0,4220	1,18	37,14
	3,0	66133	46,62	0,3932	1,49	31,21
	4,0	54467	51,20	0,3520	2,17	23,61
	5,0	46500	54,64	0,3236	2,89	18,90
	6,0	40533	57,15	0,3026	3,65	15,65
	10	28333	66,58	0,2548	6,94	9,59
	12	24300	68,53	0,2416	8,68	7,90
	20	16700	78,49	0,2157	15,78	4,97
	30	12167	85,78	0,2065	24,46	3,51
	50	8300	97,52	0,2094	40,34	2,42
	60	7100	100,11	0,2144	47,55	2,11
100	4833	113,58	0,2391	72,89	1,56	
200	2800	131,60	0,2984	123,03	1,07	
45	1,0	103000	24,21	0,5520	0,38	63,03
	1,5	87067	30,69	0,4747	0,65	47,46
	2,0	74467	35,00	0,4257	0,94	37,34
	2,5	65467	38,46	0,3910	1,25	30,76
	3,0	58600	41,31	0,3648	1,58	26,11
	4,0	47900	45,03	0,3274	2,29	19,65
	5,0	40767	47,90	0,3018	3,05	15,71
	6,0	35500	50,06	0,2830	3,84	13,02
	10	24667	57,97	0,2407	7,25	7,99
	12	20967	59,13	0,2293	9,03	6,55
	20	14267	67,05	0,2077	16,24	4,13
	30	10433	73,55	0,2015	24,93	2,95
	50	7067	83,04	0,2073	40,66	2,04
	60	6000	84,60	0,2131	47,77	1,77
100	4100	96,35	0,2396	72,78	1,32	
200	2400	112,80	0,3000	122,52	0,92	
60	1,0	94733	22,26	0,5154	0,40	55,00
	1,5	77367	27,27	0,4465	0,68	40,25
	2,0	65633	30,85	0,4026	0,98	31,54
	2,5	57633	33,86	0,3714	1,30	26,04
	3,0	51467	36,28	0,3478	1,64	22,11
	4,0	42267	39,73	0,3139	2,37	16,78
	5,0	36000	42,30	0,2904	3,14	13,47
	6,0	31367	44,23	0,2730	3,95	11,19
	10	21733	51,07	0,2333	7,43	6,88
	12	18167	51,23	0,2223	9,25	5,54
	20	12333	57,97	0,2002	16,70	3,47
	30	8900	62,75	0,1919	25,88	2,42
	50	6133	72,06	0,1932	42,91	1,68
	60	5133	72,38	0,1968	50,76	1,43
100	3467	81,47	0,2158	78,85	1,03	
200	2000	94,00	0,2623	135,78	0,69	

Continuación del ANEXO 9

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	VNE (cP)	Esfuerzo de corte (Pa)	Índice de comportamiento reológico aparente	Relación de deformación (s ⁻¹)	Viscosidad aparente (Pa s)
75	1,0	89933	21,13	0,5077	0,41	51,62
	1,5	73633	25,96	0,4403	0,68	37,89
	2,0	61567	28,94	0,3971	0,99	29,28
	2,5	53267	31,29	0,3663	1,31	23,81
	3,0	47500	33,49	0,3429	1,66	20,18
	4,0	39033	36,69	0,3090	2,40	15,32
	5,0	33567	39,44	0,2854	3,18	12,39
	6,0	29333	41,36	0,2679	4,01	10,32
	10	20233	47,55	0,2270	7,59	6,27
	12	17333	48,88	0,2154	9,48	5,16
	20	11600	54,52	0,1910	17,31	3,15
	30	8400	59,22	0,1804	27,14	2,18
	50	5467	64,24	0,1779	45,70	1,41
	60	4600	64,86	0,1800	54,36	1,19
100	3100	72,85	0,1941	85,52	0,85	
200	1800	84,60	0,2327	148,84	0,57	
90	1,0	62167	14,61	0,5047	0,41	35,52
	1,5	49600	17,48	0,4701	0,65	26,84
	2,0	43400	20,40	0,4460	0,90	22,56
	2,5	39267	23,07	0,4276	1,17	19,76
	3,0	34700	24,46	0,4126	1,44	16,99
	4,0	28833	27,10	0,3894	2,01	13,51
	5,0	24933	29,30	0,3716	2,60	11,27
	6,0	22100	31,16	0,3572	3,22	9,69
	10	15667	36,82	0,3177	5,86	6,28
	12	14033	39,57	0,3039	7,28	5,44
	20	9800	46,06	0,2659	13,44	3,43
	30	7400	52,17	0,2365	22,05	2,37
	50	4833	56,79	0,2005	41,70	1,36
	60	4167	58,75	0,1880	52,59	1,12
100	2700	63,45	0,1535	102,36	0,62	
200	1500	70,50	0,1085	266,97	0,26	

ANEXO 10

Cálculos para la obtención de la energía de activación, la constante K_T , y el promedio del índice de comportamiento reológico

CUADRO A10.1 Datos del logaritmo natural del K , $1/T$ y promedio de n para la murta en estado fresco

Temperatura (K)	1/T (1/K)	Pasta			pulpa			pulpa azucarada			
		K (Pa · s ⁿ)	Ln K	n	K (Pa · s ⁿ)	Ln K	n	K (Pa · s ⁿ)	Ln K	n	
303	0,0033	102,02	4,63	0,137	30,42	3,41	0,199	33,35	3,51	0,197	
318	0,0031	85,24	4,45	0,156	27,91	3,33	0,200	32,18	3,47	0,207	
333	0,0030	54,94	4,01	0,196	24,66	3,21	0,194	27,39	3,31	0,206	
348	0,0029	51,00	3,93	0,200	22,54	3,12	0,199	21,47	3,07	0,200	
363	0,0028	37,54	3,63	0,256	20,92	3,04	0,202	17,67	2,87	0,227	
\bar{n}				0,189				0,199			0,207

CUADRO A10.2 Datos del logaritmo natural del K , $1/T$ y promedio de n Para la murta en estado descongelado

Temperatura (K)	1/T (1/K)	Pasta			pulpa			pulpa azucarada			
		K (Pa · s ⁿ)	Ln K	n	K (Pa · s ⁿ)	Ln K	n	K (Pa · s ⁿ)	Ln K	N	
303	0,0033	93,86	4,54	0,149	41,82	3,73	0,237	39,78	3,68	0,249	
318	0,0031	76,57	4,34	0,177	36,59	3,60	0,231	34,99	3,55	0,240	
333	0,0030	60,92	4,11	0,201	32,89	3,49	0,228	30,96	3,43	0,227	
348	0,0029	56,03	4,03	0,200	29,41	3,38	0,217	29,12	3,37	0,215	
363	0,0028	46,75	3,84	0,283	21,47	3,07	0,249	21,91	3,09	0,246	
\bar{n}				0,202				0,232			0,235