

# UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería de Alimentos



*Una Institución Adventista*

## Tesis

**Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky  
(*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*)**

### Por:

Bach. Sheyla Nahomi Burgos Robles

Bach. Milagros Cecilia Rivera Shuan

### Asesor:

Dr. Reynaldo Justino Silva Paz.

### Co Asesor:

Ing. Alex Samuel Silva Baigorria

Lima, junio del 2018

## COMO CITAR:

### Estilo APA:

Burgos, N. y Rivera, M. (2018). Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*). (Tesis de pre grado). Universidad Peruana Unión, Lima - Perú.

### Estilo ISO 690:

Burgos, N. y Rivera, M. Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*). 2018. Tesis de pre grado). Universidad Peruana Unión, Lima - Perú.

### Estilo MLA:

Burgos, N. y Rivera, M. "Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*)". 2018. Universidad Peruana Unión, Lima – Perú, 2018.

**Área temática:** Ingeniería y tecnología

**Línea de investigación- UPeU:** Gestión Alimentaria

Burgos Robles, Sheyla Nahomi; Rivera Shuan, Milagros Cecilia

Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*) / Autoras: Sheyla Nahomi Burgos Robles y Milagros Cecilia Rivera Shuan. Asesor: Dr. Reynaldo Justino Silva Paz. - Lima, 2018.

154 páginas: anexos, figuras, tablas

Tesis (Licenciatura)--Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. E.P. de Ingeniería de Industrias Alimentarias, 2018. Incluye bibliografía y resumen.

Campo del conocimiento: Ingeniería de Industrias Alimentarias.

1. Parámetros reológicos. 2. Propiedades termofísicas. 3. Sanky. 4. Aguaymanto.

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Yo Reynaldo Justino Silva Paz, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*)" constituye la memoria que presenta la Bachiller Sheyla Nahomi Burgos Robles y Bachiller Milagros Cecilia Rivera Shuan para aspirar al título de Profesional de Ingeniero de Alimentos ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones de este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima., a los 22 de agosto del 2018.



---

Dr. Reynaldo Justino Silva Paz

Propiedades reológicas y termofísicas de pulpa de sanky  
(Corryocactus brevistylus y aguaymanto (Physalis peruviana L.)

# TESIS

Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero de Alimentos

## JURADO CALIFICADOR



Dr. Julio Florencio Paredes Guzmán  
**Presidente**



Mg. Daniel Sumire Quenta  
**Secretario**



PhD. Leonor Segunda Bustinza Cabala  
**Vocal**



Ing. Oscar Amado Crisostomo Gordillo  
**Vocal**



Dr. Reynaldo Justino Silva Paz  
**Asesor**

Lima, 12 de junio de 2018

### **Dedicatoria**

A Dios, quién nos dió la sabiduría y fuerzas para  
poder culminar nuestra carrera profesional.

Con mucho amor y respeto a nuestros padres, por  
su sacrificio, confianza y apoyo incondicional.

A la familia Burgos Robles y Rivera Shuan por  
toda su ayuda.

Milagros y Nahomi

## **Agradecimiento**

A nuestro Padre Celestial por brindarnos sabiduría, fuerza y paciencia para realizar este trabajo de investigación.

A nuestros queridos padres: Guillermo Rivera, Martina Shuan, Sonia Robles y Victor Burgos; a la Familia Rivera Shuan y Burgos Robles, por todo su apoyo para la realización de este trabajo de investigación.

A nuestros asesores, Dr. Reynaldo Silva Paz e Ing. Samuel Silva Baigorria, por asesorarnos en el desarrollo de la investigación.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú por permitirnos el acceso a sus equipos para los ensayos experimentales reológicos y termofísicos.

A la Universidad Peruana Unión, a la dirección de escuela de Ingeniería de Alimentos a cargo del Dr. Julio Paredes, por permitirnos el uso de los equipos para los análisis fisicoquímicos.

A nuestros docentes por su apoyo desinteresado y su disposición a resolver nuestras dudas.

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA .....	1
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	3
2.1    Frutos Andinos.....	3
2.1.1    Aguaymanto.....	3
2.1.2    Sanky o sancayo .....	7
2.2    Reología.....	10
2.2.1    Clasificación reológica de fluidos .....	11
2.2.2    Modelos matemáticos para fluidos alimenticios .....	16
2.2.3    Efecto de diferentes factores sobre la viscosidad aparente e índice de consistencia .....	18
2.2.4    Reómetros.....	20
2.3    Propiedades termofísicas .....	21
2.3.1    Calor Específico (Cp).....	22
2.3.2    Conductividad térmica.....	23
2.3.3    Difusividad térmica .....	24
2.3.4    Métodos de análisis térmicos.....	25
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
3.1    Lugar de ejecución.....	32
3.2    Materiales e insumos.....	32
3.2.1    Materia prima .....	32
3.2.2    Insumos.....	32
3.2.3    Materiales .....	32
3.2.4    Equipos .....	32
3.2.5    Reactivos .....	33
3.3    Metodología experimental .....	33
3.3.1    Análisis fisicoquímico de las frutas: Aguaymanto y Sanky .....	36
3.3.2    Determinación de los parámetros reológicos.....	36
3.3.3    Determinación de las propiedades termofísicas. ....	38
3.4    Análisis Estadístico.....	42
3.4.1    Análisis de los parámetros reológicos .....	42
3.4.2    Análisis de las propiedades termofísicas .....	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION .....	45
4.1    Análisis fisicoquímicos.....	45
4.2    Comportamiento reológico de la pulpa de aguaymanto y sanky .....	47

4.2.1.	Índice de Consistencia (k) e Índice de flujo(n).....	47
4.2.2.	Análisis estadístico .....	54
4.2.3.	Efecto de la temperatura y la concentración sobre el índice de comportamiento de flujo e índice de consistencia.....	62
4.2.4.	Efecto de la temperatura y la concentración sobre la viscosidad aparente....	68
4.2.5.	Parámetros viscoelásticos .....	86
4.3.	Propiedades termofísicas de las pulpas de frutas .....	95
4.3.1.	Densidad .....	95
4.3.2.	Calor específico .....	97
4.3.3.	Conductividad térmica.....	99
4.3.4.	Difusividad térmica .....	101
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....		105
REFERENCIAS .....		105
ANEXOS .....		124

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía del aguaymanto ( <i>Physalis Peruviana L.</i> ) .....	4
Tabla 2. Composición fisicoquímica del aguaymanto ( <i>Physalis Peruviana L.</i> ) .....	5
Tabla 3. Contenido nutricional del aguaymanto ( <i>Physalis peruviana L.</i> ) por 100g de parte comestible.....	6
Tabla 4. Taxonomía del sanky.....	9
Tabla 5. Composición fisicoquímica de la pulpa fresca de sanky ( <i>Corryocactus brevistylus</i> ) .....	10
Tabla 6. Composición nutricional de la pulpa fresca de sanky ( <i>Corryocactus brevistylus</i> )	10
Tabla 7. Clasificación de los métodos de análisis térmico .....	26
Tabla 8. Aplicaciones del DSC en la industria alimentaria.....	31
Tabla 9. Diseño factorial $3^2$ para la determinación de los parámetros reológicos.....	43
Tabla 10. DCA para la determinación de los parámetros Viscoelásticos.....	43
Tabla 11. DCA para la determinación de las propiedades termofísicas .....	44
Tabla 12. Análisis fisicoquímico de la pulpa de <i>Corryocactus brevistylus</i> y <i>Physalis peruviana L.</i> .....	45
Tabla 13. Parámetros reológicos del modelo de Ley de Potencia, Herschel y Bulkley y Casson para la pulpa de sanky y aguaymanto a diferentes temperaturas y concentraciones .....	52
Tabla 14. Errores de los modelos matemáticos aplicados en la pulpa de sanky .....	55
Tabla 15. Errores de los modelos matemáticos aplicados en la pulpa de aguaymanto ..	56
Tabla 16. Parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto según el modelo de ley de la potencia.....	58
Tabla 17. Energía de activación de flujo de la pulpa de sanky y aguaymanto por medio de la ecuación de Arrhenius .....	63
Tabla 18. Parametros de la influencia de la concentración sobre el índice de consistencia	64
.....	65
Tabla 19. Parámetros de la influencia de la temperatura y concentración sobre el índice de consistencia.....	67
Tabla 20. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a diferentes concentraciones y velocidad de cizalla constante.....	77
Tabla 21. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a diferentes concentraciones y velocidad de cizalla constante. ....	78
Tabla 22. Efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a diferentes temperaturas y velocidad de cizalla constante. ....	82
Tabla 23. Efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a diferentes temperaturas y velocidad de cizalla constante. ....	83

Tabla 24. Efecto combinado de la temperatura y concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a velocidad de cizalla constante. ....	85
Tabla 25. Efecto combinado de la temperatura y concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a velocidad de cizalla constante. ....	85
Tabla 26. Parámetros viscoelásticos en la pulpa de sanky y aguaymanto. ....	94
Tabla 27. Propiedades termofísicas de la pulpa de sanky y aguaymanto. ....	104
Tabla 28. Datos obtenidos en el DSC para la pulpa de sanky .....	135
Tabla 29. Datos obtenidos en el DSC para la pulpa de aguaymanto .....	136
Tabla 30. Resultados obtenidos para las propiedades termofísicas de la pulpa de sanky a diferentes temperaturas y concentraciones. ....	137
Tabla 31. Resultados obtenidos para las propiedades termofísicas de la pulpa de aguaymanto a diferentes temperaturas y concentraciones. ....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fruto del aguaymanto.....	4
Figura 2. Fruto del Sanky ( <i>Corryocactus brevistylus</i> ) .....	8
Figura 3. Clasificación reológica de fluidos .....	12
Figura 4. Reómetro rotacional de cilindros concéntricos (a), Reómetro rotacional de placas paralelas (b), Reómetro rotacional de cono y placa (c). .....	21
Figura 5. Esquema de DSC.....	29
Figura 6. Flujograma del experimento para la determinación propiedades termofísicas y parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.....	34
Figura 7. Reogramas de la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.....	48
Figura 8. Reogramas de la pulpa de Aguaymanto a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.....	49
Figura 9. Grafica de superficie de respuesta y de contorno para la viscosidad aparente ( $a_1$ y $a_2$ ), índice de flujo ( $b_1$ y $b_2$ ) e índice de consistencia ( $c_1$ y $c_2$ ) de la pulpa de sanky. ....	60
Figura 10. Grafica de superficie de respuesta y de contorno para la viscosidad aparente ( $a_1$ y $a_2$ ), índice de flujo ( $b_1$ y $b_2$ ) e índice de consistencia ( $c_1$ y $c_2$ ) de la pulpa de aguaymanto. ....	61
Figura 11. Logaritmo natural del índice de consistencia frente al inverso de la temperatura absoluta a diferentes concentraciones de pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b) .....	64
Figura 12. Índice de consistencia frente a la concentración a diferentes temperaturas de pulpa de sanky y aguaymanto.....	66
Figura 13. Viscosidad aparente frente a la gradiente de velocidad a diferentes temperaturas para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de sanky. ....	70
Figura 14. Viscosidad aparente frente a la gradiente de velocidad a diferentes temperaturas para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de aguaymanto. ....	71
Figura 15. Viscosidad aparente frente a la inversa de la temperatura a diferentes gradientes de velocidad para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de sanky. ....	75
Figura 16. Viscosidad aparente frente a la inversa de la temperatura a diferentes gradientes de velocidad para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de aguaymanto. ....	76
Figura 17. Viscosidad aparente frente a la concentración a diferentes gradientes de velocidad para 20 (a), 40 (b) y 60 °C (c), en pulpa de sanky. ....	79
Figura 18. Viscosidad aparente frente a la concentración a diferentes gradientes de velocidad para 20°C (a), 40°C (b) y 60 °C (c), en pulpa de aguaymanto. ....	80
Figura 19. Valores del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ) en función de la frecuencia para la pulpa sanky para una concentración de 65°Brix a temperaturas de 25°C (a), 40°C (b) y 60°C (c). ....	88
Figura 20. Valores del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ) en función de la frecuencia para la pulpa aguaymanto para una concentración de 65°Brix a temperaturas de 25 (a), 40 (b) y 60°C (c). ....	89

Figura 21. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b) a una concentración de 65°Brix .....	90
Figura 22. Efecto de la temperatura sobre la función de pérdida ( $\tan \delta$ ) para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b) a una concentración de 65°Brix.....	92
Figura 23. Comparación de la densidad experimental y teórica para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b). .....	96
Figura 24. Comparación del calor específico experimental y teórico para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b).....	98
Figura 25. Conductividad térmica experimental y teórica en función a la temperatura y concentración de las pulpas de sanky(a) y aguaymanto (b). .....	100
Figura 26. Difusividad térmica experimental y teórica en función a la temperatura y concentración de las pulpas de sanky(a) y aguaymanto (b). .....	102
Figura 27. Acondicionamiento del sanky para la obtención de la pulpa libre de pepas y otros residuos. ....	124
Figura 28. Acondicionamiento del aguaymanto para la obtención de la pulpa libre de pepas y otros residuos. ....	125
Figura 29. Pulpa de sanky.....	126
Figura 30. Pulpa de aguaymanto. ....	126
Figura 31. Azúcar usado para regular la concentración de las pulpas en los diferentes tratamientos. ....	126
Figura 32. Distribución de pulpa de aguaymanto en bolsas de polietileno, 50 ml en cada una. ....	127
Figura 33. Reómetro rotacional empleado en el análisis de los parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.....	128
Figura 34. Usillo cilindro concéntrico usado para el estudio de los parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.....	128
Figura 35. Adición de la muestra de pulpa de sanky en el cilindro del reómetro. ....	129
Figura 36. Reogramas del modelo Casson para la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas. ....	130
Figura 37. Reogramas del modelo Hershel-Bulkley para la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.....	131
Figura 38. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 25°Brix.....	132
Figura 39. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 45 °Brix.....	132
Figura 40. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 65 °Brix.....	133
Figura 41. Termograma de la pulpa de sanky a 25 °Brix.....	133
Figura 42. Termograma de la pulpa de sanky a 45 °Brix.....	134
Figura 43. Termograma de la pulpa de sanky a 65 °Brix.....	134

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Proceso para la obtención de pulpa de frutos andinos .....	124
Anexo 2. Acondicionamiento de pulpa para el estudio .....	126
Anexo 3. Instrumento para el estudio de los parámetros reológicos. ....	128
Anexo 4. Reogramas de las pulpas de frutas. ....	130
Anexo 5. Termogramas de las pulpas de frutas.....	132
Anexo 6. Datos registrados en el DSC. ....	135
Anexo 7. Propiedades termofísicas de la pulpas de frutas. ....	137

## Nomenclatura

$T_1$ : Temperatura del alimento en la superficie a un tiempo dado  $t_1$ , ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_2$ : Temperatura del alimento en la superficie a un tiempo dado  $t_2$ , ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura ( $T_1 - T_2$ ), ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta q$ : Diferencia de calor ( $q_0 - q_1$ ), (W)

A: Área transversal de la muestra, (m)

$C_p$ : Calor específico, (KJ/kg  $^{\circ}\text{C}$ )

L: Altura de la muestra, (m)

m: Masa del alimento, (kg)

$P_m$ : Peso de picnómetro con muestra, (g)

$P_v$ : Peso de picnómetro vacío, (g)

q: Cantidad de calor aplicado, (W)

x= Distancia de transferencia de calor del alimento, (m)

$K_i$ : Conductividad térmica de cada componente, (W/mK)

$X_{mi}$ : Fracción másica de cada componente, (kg)

$\tau$ : Tensión de cizallamiento (Pa.)

$K$ : Índice de consistencia (Pa. s)

$\dot{\gamma}$  : Taza de deformación ( $\text{s}^{-1}$ )

n: Índice de flujo de comportamiento

$\eta_{pl}$ : Viscosidad plástica de Bingham

$\tau_0$ : Tensión crítica (Pa.)

$K_H$ : Índice de consistencia (Pa. s)

$n_H$ : Índice del comportamiento de flujo

$K_{0C}$  : Tensión inicial (P.a.)

$K_c$ : Viscosidad plástica de Casson

$K_{0M}$  : Raíz cuadrada de la tensión inicial (Pa<sup>0,5</sup>)

$K_M$  : Índice de consistencia (Pa<sup>0,5</sup>.s<sup>n</sup>)

$n_M$ : Índice de comportamiento del fluido (adimensional)

$A_0$  : Medida de tensión tangencial

$B_0$  : Coeficiente de destrucción estructural

$\tau_e$ : Tensión de cizallamiento de equilibrio (Pa.)

$K_i$ : Constante cinética de degradación estructural

$\eta_{app}$ : Viscosidad aparente (mPa.s)

$E_a$ : Energía de activación (J/mol)

$T$ : temperatura absoluta (K)

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

$\eta_0$ : Factor preexponencial

$K_0$ : Factor preexponencial

$C$ : Concentración de la pulpa (°Brix)

$\eta_1$  y  $\alpha$ : Parámetros de la ecuación 13

a y b: Parámetros de la ecuación 14

$\delta$  y  $\varepsilon$ : Parámetros de la ecuación 15

$K_1$  y  $n_1$ : Parámetros de la ecuación 16

$K_2$  y  $n_2$ : Parámetros de la ecuación 17

$\delta$ : Ángulo de desfase ( $^\circ$ )

$G'$ : Módulo de almacenamiento (componente elástica) (Pa)

$G''$ : Módulo de pérdida (componente viscosa) (Pa)

$\eta^*$ : Viscosidad compleja (Pa. s)

$\tau_{oi}$ : Tensión de cizallamiento crítica inicial (Pa)

$\tau_{ei}$ : Tensión de cizallamiento crítica inicial (Pa)

t: Tiempo (h, min y s)

$\alpha$ : Difusividad térmica, ( $m^2/s$ )

$\rho_{H_2O_T}$ : Densidad del agua a las diferentes temperaturas de estudio, ( $kg/m^3$ )

$P_{H_2O}$  : Peso de picnómetro con agua a diferentes temperaturas, (g)

## Resumen

El Perú tiene una amplia gama de frutos andinos, ricos en nutrientes y dan un buen aporte para la salud de los consumidores. No obstante, estos tienen un bajo consumo como producto fresco y/o procesado, incluido el sanky y aguaymanto, lo cual puede ser atribuido a que no se conoce sus características reológicas y propiedades termofísicas. El objetivo de la investigación fue determinar los parámetros reológicos y propiedades termofísicas de pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana L.*) a diferentes concentraciones de sólidos y temperaturas. Las pulpas de frutos andinos (sanky y aguaymanto) fueron concentradas a 25, 45 y 65 °Brix y temperaturas de 25, 40 y 60 °C. Para evaluar el efecto de la concentración y la temperatura sobre los parámetros reológicos ( $\eta_{app}$ ,  $n$  y  $k$ ) se aplicó un diseño factorial  $3^2$ , para el efecto de la temperatura sobre los módulos oscilatorios ( $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^*$  y  $\tan \delta$ ) y el efecto de la concentración sobre las propiedades termofísicas ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\kappa$  y  $\alpha$ ) se aplicó un DCA. Ambas pulpas presentaron un comportamiento pseudoplástico. El análisis de varianza mostró que las variables independientes (°Brix y °C) generaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en los parámetros reológicos de las pulpas, se presentó una relación inversa entre ambas variables independientes y los mejores valores, según la gráfica de superficie respuesta, se encontraban a una mayor concentración y menor temperatura. De igual forma, la temperatura generó diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los módulos oscilatorios de las muestras, la pulpa de sanky presentó un comportamiento semi-sólido en las tres temperaturas y el aguaymanto un comportamiento semi-líquido en las muestras de 25 y 40 °C y semi-sólido en la muestra a 60 °C. La concentración también generó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en las propiedades termofísicas de las pulpas, estas propiedades descendieron conforme aumentaba la concentración.

**Palabras claves:** Parámetros reológicos, propiedades termofísicas, sanky, aguaymanto.

## Abstract

Peru has a wide range of andean fruits, rich in nutrients and good support for the health of consumers. However, these have low consumption as a fresh or processed product, including sanky and aguaymanto, which can be attributed to their unknown rheological characteristics and thermophysical properties. The objective of the research was to determine the rheological parameters and thermophysical properties of sanky pulp (*Corryocactus brevistylus*) and aguaymanto (*Physalis peruviana L.*) at different concentrations of solids and temperatures. The pulps of Andean fruits (sanky and aguaymanto) were concentrated at 25, 45 and 65 ° Brix and temperatures of 25, 40 and 60 ° C. For the effect of concentration and temperature on the rheological parameters ( $\eta_{app}$ ,  $n$  and  $k$ ) a factorial design was applied  $3^2$ , for the effect of the temperature on the oscillatory modules ( $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^*$  and  $\tan \delta$ ) and the effect of the concentration on the thermophysical properties ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\kappa$  and  $\alpha$ ) was applied to DCA, both pulps presenting a pseudoplastic behavior. The analysis of variance showed that the independent variables (° Brix and ° C) generated significant differences ( $p < 0.05$ ) in the rheological parameters of the pulps, an inverse relationship between the independent variables and the best values was presented, according to the graph of surface response, it is found at a higher concentration and lower temperature, in the same way, the higher temperature difference ( $p < 0.05$ ) between the oscillating modules of the samples, the pulp of sanky presents a comp semi-solid in the three temperatures and the non-contaminated semi-liquid water in the samples of 25 and 40 ° C and semi-solid in the sample at 60 ° C. The concentration also generated significant differences ( $p < 0.05$ ) in the thermophysical properties of the pulps, these properties decreased as the concentration increased.

**Key words:** Rheological parameters, thermophysical properties, sanky, aguaymanto.

## **CAPÍTULO I: EL PROBLEMA**

En la actualidad el alto consumo de alimentos sanos y naturales promueve la innovación de productos, debido al alto valor nutritivo que pueden aportar las materias primas y el beneficio que estos producen en nuestra salud.

El Perú posee una gran diversidad de frutos nativos con un alto valor nutricional, pero con un escaso consumo como es el caso del sanky y aguaymanto. El consumo de estos frutos se limita al estado fresco, debido al desconocimiento de sus propiedades y los beneficios para la salud. Tanto el sanky como el aguaymanto son frutos andinos que representan una parte de la flora y gran diversidad biológica del país. Estas plantas pueden ser cultivadas en diversas partes de Sudamérica, especialmente las regiones andinas.

La falta de industrialización del aguaymanto y sanky depende de diversos factores, uno de estos es el desconocimiento del comportamiento reológico y las propiedades termofísicas debido a la falta de desarrollo de la ingeniería de alimentos y carencia de equipos y personal calificado. La falta de estas propiedades dificulta su uso en la industria alimentaria debido a que estos son importantes en control de los procesos, el cual resulta útil en las operaciones de calentamiento, secado, congelamiento, diseño de procesos y equipos de ingeniería, además, de su calidad y su aceptación sensorial. El sanky y aguaymanto presentan diferentes matrices alimentarias, evidencia de la complejidad de composición, textura, variedad, y otras características propias, es necesario la determinación adecuada de estas propiedades para poder describir estas propiedades en alimentos andinos del Perú.

Además, la caracterización del aguaymanto y sanky se desarrolla para su procesamiento a escala industrial, ya que estas resultan imprescindibles para el desarrollo de nuevos productos. Estos frutos atienden a las necesidades de varios segmentos de la industria

alimentaria tales como la industria de jugos naturales, helados, mermeladas, etc., que se encuentran en la búsqueda de nuevos alimentos funcionales.

Por esta razón, los conocimientos adquiridos en ingeniería de alimentos serán aplicados para investigar y determinar las condiciones y parámetros óptimos que influyen sobre estas propiedades en la pulpa de aguaymanto y sanky.

El trabajo de investigación presentado es de gran importancia, pues incentivará a que otros realicen investigaciones más profundas sobre las propiedades termofísicas y reológicas de otros frutos nativos, silvestres o andinos.

El objetivo de la investigación es determinar los parámetros reológicos y propiedades termofísicas de pulpas de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*) a diferentes concentraciones de sólidos y temperaturas.

## CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Frutos Andinos

#### 2.1.1 Aguaymanto

##### 2.1.1.1 Generalidades

Esta planta fue conocida por los incas, según Fischer (2000), y su origen se le atribuye a los valles bajos andinos de Perú y Chile, y está bien distribuido en las zonas altas de sudamérica. El aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) es conocido también en países como Ecuador bajo el nombre de uvilla, tepareey makowi en la India, chuchuva en Venezuela, groselha do Perú en Portugal, Kapstachelbeere en Alemania, Fisalis en Italia, Lampion en Holanda y cape gooseberry en los países de lengua inglesa. (Gerhard et. al, 2014).

##### 2.1.1.2 Descripción botánica y morfología

La planta de aguaymanto es de consistencia herbácea, con un ciclo productivo anual, y considerada como una planta silvestre con gran potencial económico que crece en la costa, sierra y selva del Perú; produciendo hasta 30 Tm/ha (Rojas, 2013). De porte bajo hasta una altura de  $1.5 \pm 0.3$  m. Los tallos y las hojas están cubiertos por una pubescencia fina y blancuzca que desaparece con la edad. Encina (2010) menciona que el aguaymanto logra adaptarse fácilmente a diversas condiciones agroecológicas, especialmente en zonas de clima templado cálido, con buena luminosidad, en altitudes de  $2850 \pm 150$  msnm, a temperaturas de  $13 \pm 5$  °C, humedad relativa de  $85 \pm 5$  % y una precipitación de  $675 \pm 228$  mm/año bien distribuidos durante el año.

Su fruto mide de  $1.75 \pm 0.75$  cm de diámetro y contiene en su interior alrededor de  $150 \pm 50$  semillas pequeñas (Navarro, 2015). El fruto es una baya carnosa en forma de globo y pesa entre 4 a 12 gramos (Figura 1). Su pulpa presenta un sabor agridulce de buen gusto,

varia de color des un verde pálido a un amarillo-naranja fuerte en el momento en que se encuentra listo para la cosecha, con semillas amarillas pequeñas y suaves que pueden comerse. Cuando la fruta está madura, es dulce con un ligero sabor agrio. El fruto se encuentra cubierto por una envoltura natural que lo ayuda a mantenerse fresco, sin dañarse, durante algunas semanas después de haber sido extraído de la planta (Navarro, 2015).



Figura 1. Fruto del aguaymanto (Encina, 2010)

### 2.1.1.3 Clasificación Taxonómica

El aguaymanto (*Physalis Peruviana*), pertenece a la familia de las Solanaceae; es decir, posee características similares a la familia de la papa, el tomate ají y rocoto, aun cuando su crecimiento es arbustivo; y al género *Physalis*. (Tabla 1).

Tabla 1. Taxonomía del aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*) (Schreiber, 2015)

Taxonomía	
<b>Reino :</b>	<i>Plantae</i>
<b>División :</b>	<i>Magnoliophyta</i>
<b>Clase :</b>	<i>Magnoliopsida</i>
<b>Orden :</b>	<i>Solanales</i>
<b>Familia :</b>	<i>Solanaceae</i>
<b>Subfamilia :</b>	<i>Solanoideae</i>
<b>Tribu :</b>	<i>Physaleae</i>
<b>Subtribu :</b>	<i>Physalinae</i>
<b>Género :</b>	<i>Physalis</i>
<b>Especie :</b>	<i>Physalis peruviana L.</i>

#### 2.1.1.4 Composición fisicoquímica y valor nutricional

Los valores del contenido de sólidos solubles ( $^{\circ}$ Brix) y porcentaje de acidez (% ácido cítrico) en el Aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*) varían en un rango de  $13.4 \pm 1.3$  y  $2.2 \pm 0.3$  respectivamente. Así mismo, Puente et. al (2011) menciona que el proceso de maduración en la fruta causa una disminución del pH y los  $^{\circ}$ Brix. A continuación, en la Tabla 2 se presentan los reportes de la composición fisicoquímica de *Physalis Peruviana L* a partir de diferentes investigaciones.

Tabla 2. Composición fisicoquímica del aguaymanto (*Physalis Peruviana L.*)  
(Tacanga, 2015).

<b>Parámetro fisicoquímico</b>	<b>(Mendoza, Rodríguez &amp; Millán, 2012).</b>	<b>(Marín, Cortés &amp; Montoya, 2010)</b>	<b>(Márquez, Trillos, Cartagena &amp; Cotes, 2009).</b>	<b>Restrepo, Cortés &amp; Márquez, 2009).</b>
<b>Actividad de Agua (Aw)</b>	0.99	0.98	-	0.99
<b>Acidez (%)</b>	2.00	2.05	2.40	2.10
<b><math>^{\circ}</math>Brix</b>	13.00	14.30	12.50	13.80
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.10	1.04	-	-
<b>pH</b>	3.72	3.39	3.56	3.39

Tiene un alto contenido de provitamina A (3000 UI de caroteno en 100g), vitamina C y algunas vitaminas del complejo B. También está compuesto por carbohidratos (19.6g) tales como la fructuosa, sacarosa y polisacáridos (celulosa, almidón, pectina); proteínas ( $0.175 \pm 0.17$ g), un alto nivel de fósforo, entre otros (Tabla 3). Se han realizado estudios que comprueban los beneficios de este fruto en la salud de quien lo consume, posee propiedades anticancerígenas y contribuye a disminuir los niveles de glucosa y colesterol en la sangre. (Ramadán & Mörsel, 2003).

Tabla 3. Contenido nutricional del aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) por 100g de parte comestible (Tacanga, 2015).

<b>Compuesto</b>	<b>(Ramadán &amp; Mörsel, 2003).</b>	<b>Osorio y Roldán (2003)</b>	<b>Repo de Carrasco &amp; Zelada (2008)</b>
<b>Energía (cal)</b>	73.0	49.0	76.8
<b>Agua (g)</b>	78.9	85.9	79.8
<b>Proteína (g)</b>	0.05-0.3	1.5	1.9
<b>Grasa (g)</b>	0.15-0.2	0.5	0.0
<b>Carbohidratos (g)</b>	19.6	11.0	17.3
<b>Fibra (g)</b>	4.9	0.4	3.6
<b>Ceniza (g)</b>	1.0	0.7	1.0
<b>Calcio (mg)</b>	8.0	-	-
<b>Fósforo (mg)</b>	55.3	21.0	33
<b>Hierro (mg)</b>	1.2	-	1.7
<b>Tiamina (mg)</b>	0.1	-	-
<b>Riboflavina (mg)</b>	0.03	-	-
<b>Niacina (mg)</b>	1.7	-	1.3
<b>Ácido ascórbico (mg)</b>	43.0	28.0	-

La principal zona de producción de aguaymanto en el Perú es Cajamarca (San Miguel), lugar donde se inició su cultivo con fines comerciales. Existen también otras fuentes de producción en La Libertad (Chicama), Huánuco, Apurímac, Cuzco (Valle del Yrubamba), Ancash, Junín y Ayacucho (Ramos, 2010).

## **2.1.2 Sanky o sancayo**

### ***2.1.2.1 Generalidades***

Las Cactáceas en América del Sur son propias de las vertientes occidentales y valles profundos interiores de la Cordillera Andina. Los biotopos sobre los que se asientan son áreas climáticas áridas, característicos por su escasa estabilidad, con ríos de fango y desprendimientos (Strahler, 1992; citado por Carpio & Figueroa, 2017).

El género *Corryocactus* es arbustivo o arbóreo, de pocas costillas, espinas fuertes, flores en embudo o en reloj de arena, con tubo floral corto y grueso, receptáculo con muchas escamas, pelos y espinas axilares. Frutos globulares, espinosos, funículo jugoso, semillas ovales, lisas o tuberculadas, con cubierta mucilaginosa. Son alrededor de 30 especies, la mayoría pertenecen al Perú (23 especies), y el resto de Bolivia y norte de Chile (Ostolaza, 2011).

### ***2.1.2.2 Descripción botánica y morfología***

El sanky, sancayo o guacalla (*Corryocactus brevistylus*) es una especie de cactácea de cuerpo arbustivo o a menudo arborescente, de  $3.25 \pm 2.47$  m de altura, con tronco corto y grueso de hasta 50 cm de diámetro, ramificado principalmente desde la base. Ramas articuladas, frecuentemente de varios metros de largo de  $11.5 \pm 4.95$  cm de grosor, con la epidermis verde, que puede tornarse amarillenta por insolación. Espinas derechas, amarillas a rojizas, aciculares, no bien definidas. Las del borde son delgadas y cortas, de  $1.65 \pm 1.91$  cm de longitud, y las más céntricas,  $3 \pm 1.41$  cm, son más largas. Flores laterales, diurnas, sin perfume, de  $9.5 \pm 2.12$  cm de longitud, con corola muy abierta, y amarillo-doradas; tubo floral densamente cubierto de escamas angostas verde-grisáceas y fieltro grisáceo; estambres doblados hacia adentro; estigma muy ramificado. Fruto grande, de  $8.5 \pm 2.12$  cm de

diámetro, redondo, verde oliva, de pulpa ácida y jugosa, con numerosas semillas marrón (Figura 1) (Hoffmann & Walter, 2004)

Es una especie Nativa del sur de Perú y norte de Chile. El hábitat natural se encuentra en las laderas rocosas de la pre cordillera andina, entre aproximadamente los  $3200 \pm 2.12$  msnm, con una marcada preferencia por sectores de exposición sur en las zonas más bajas y, a mayores elevaciones, con mayor amplitud de ubicaciones. La especie posee más de 10 localidades conocidas (Cáceres et al, 2000).



Figura 2. Fruto del Sanky (*Corryocactus brevistylus*)

### ***2.1.2.3 Clasificación taxonómica***

En el año 1942 el sanky o sancayo fue conocido por primera vez con el nombre de *Thrichocereus*, para diferenciarlo de los otros géneros se le agrego *specius*. Arthur Cronquist en 1988, luego de realizar diversas investigaciones, logro llegar a la siguiente clasificación sistemática (Tabla 4) (Mostacero et al., 2002).

Según Aragón & Giovanni (1981):

Tabla 4. Taxonomía del sanky (Rose & Britton,1920)

<b>Taxonomía</b>	
<b>División :</b>	<i>Magnoliophyta= (angiospermae)</i>
<b>Clase :</b>	<i>Magnoliopsida= (dicotiledoneae)</i>
<b>Sub-clase :</b>	<i>Caryophyllydae</i>
<b>Orden :</b>	<i>Cariophyllales</i>
<b>Familia :</b>	<i>Cactaceae</i>
<b>Genero :</b>	<i>Corryocactus</i>
<b>Especie :</b>	<i>Corryocactus brevistylus (Schumann ex Vaupel)</i>

#### ***2.1.2.4 Composición química y valor nutricional***

En la tabla 5 se presentan los valores de la composición fisicoquímica de la pulpa fresca de sanky, obtenida por diversos investigadores (Nolazco & Guevara, 2009; Málaga & Rodríguez, 2014; Evangelista & Rivas, 2015; Carpio & Figueroa, 2017). De acuerdo con lo reportado, el sanky presenta las condiciones para su conservación natural.

Estudios realizados por diversos autores muestran que el Sanky o Sancayo tiene altos índices de vitamina C o ácido ascórbico más que el limón e igualando las cualidades antioxidantes del Camu Camu, además posee calcio y altas cantidades de potasio superando al plátano.

En la tabla 6 se puede observar en bajo contenido de grasa y un contenido calórico de menor al de frutas como: la manzana (56 Kcal/100 g), plátano (85 Kcal/100g.) y toronja (41 Kcal/100g). Además, el alto contenido de vitamina C evidencia la importancia de este fruto (Céspedes & Cary, 1998; Cáceres et al.,2000; Nolazco & Guevara, 2009).

Tabla 5. Composición fisicoquímica de la pulpa fresca de sanky (*Corryocactus brevistylus*)

Fisicoquímico	(Nolazco & Guevara, 2009)	(Evangelistica & Rivas, 2015)	(Málaga & Rodríguez, 2014)	(Carpio & Figueroa, 2017)
Acidez (%)	2.3	2.69 ± 0.071	6.4	2.45
°Brix	2.9	3.4 ± 0.25	5	4
pH	2.7	2.95 ± 0.033	2.5	2.5
Densidad (g/ml)	-	0.929 ± 0.011	-	-

Tabla 6. Composición nutricional de la pulpa fresca de sanky (*Corryocactus brevistylus*)

Componente	(Céspedes & Cary, 1998)	(Cáceres et al., 2000)	(Nolazco & Guevara, 2009)
Humedad (%)	93.7	96.74	95.2
Carbohidratos (%)	5.97	-	3.1
Ceniza (%)	0.09	0.27	0.4
Energía total (kcal)	-	-	17.6
Grasa (%)	0.06	0.03	0.0
Fibra (%)	1.74	0.04	0.9
Proteína (%)	0.18	0.15	1.3
Calcio (ppm)	-	-	104.5
Potasio (ppm)	-	-	5566.4
Fosforo (ppm)	-	-	12.8
Vitamina C (mg)	-	37.58	57.1

## 2.2 Reología

Las medidas reológicas son consideradas como una herramienta analítica, que brinda una mejor comprensión de la organización estructural de los alimentos. Varios factores afectan el comportamiento reológico de las pulpas de frutas, destacándose entre estas, la temperatura, sólido soluble y tamaño de partículas.

La reología estudia la deformación y flujo de la materia, extendiéndose desde la mecánica de fluidos hasta la elasticidad de Rooke. La deformación ocurre cuando la materia se encuentra en estado sólido, y el flujo, cuando la materia está en estado líquido. Las

propiedades reológicas de interés en el caso de sólidos es la elasticidad y en el caso de líquidos es la viscosidad. En tanto, algunos materiales no pueden ser diferenciados en sólidos o líquidos con certeza, de modo que la propiedad reológica de interés en este caso es la viscoelasticidad (Rao, 1992; citado por Martins, 2009).

### **2.2.1 Clasificación reológica de fluidos**

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 sus 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 respecto a la viscosidad. Además, existen alimentos en los que el comportamiento reológico depende del tiempo de esfuerzo de corte que se ejerce sobre ellos. Finalmente, existen otros grupos de alimentos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, los llamados fluidos viscoelásticos (Holdsworth, 1971; Barbosa-Cánovas et al., 1993). Así, la clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

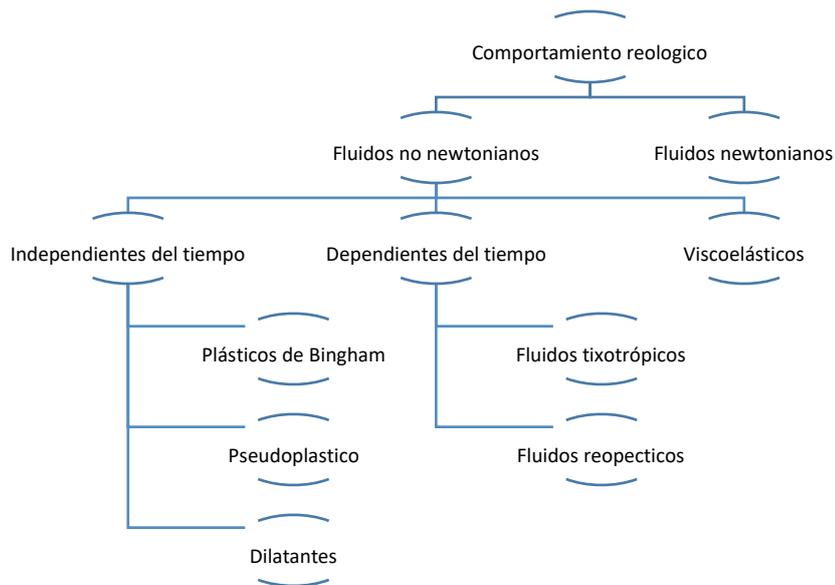


Figura 3. Clasificación reológica de fluidos (Adaptado de Martins, 2009).

### 2.2.1.1 Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos carecen de propiedades elásticas; son incompresibles, isotrópicos y, como el sólido de Hooke, es irreal. Sin embargo, diversos líquidos reales presentan un comportamiento newtoniano en un gran rango de esfuerzos de deformación. Siendo considerados por los reólogos como líquidos newtonianos (Ramírez & Navas, 2006). El comportamiento reológico de los fluidos newtonianos puede describirse mediante la ley de Newton

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

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. Influidando también la concentración; a concentraciones bajas, pueden mostrar una conducta newtoniana incluso las disoluciones macromoleculares. En general, para ofrecer comportamiento

newtoniano, las suspensiones macromoleculares deben poseer una estructura discontinua. Así mismo las partículas deben comportarse rígidamente y no debe existir interacción entre ellas. Algunos de los alimentos que presentan un comportamiento newtoniano son el agua y las disoluciones diluidas de azúcares, te, café, leche (Bourne, 1982; Perry & Chilton, 1982).

### ***2.2.1.2 Fluidos no-newtonianos***

#### ***2.2.1.2.1 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, es decir, las propiedades reológicas son independientes del tiempo de aplicación de la tensión de cizallamiento (Tscheuschner, 2001).

##### **- Fluidos dilatantes**

En este tipo de fluidos la viscosidad aumenta con la tasa de corte, lo inverso al comportamiento pseudoplastico. La dilatancia es una propiedad de los fluidos que evidencia una formación o reorganización de la estructura de la muestra, dando como resultado un aumento de la viscosidad aparente y tasa de deformación al aplicar una fuerza. Los modelos reológicos que se utilizan para describir este comportamiento son los mismos que los aplicados para describir el comportamiento pseudoplastico. Existen pocos alimentos que presenten estas características (Rha, 1978).

##### **- Fluidos plásticos de Bingham**

Este tipo de fluido necesita de una tensión crítica o tensión inicial, para fluir. Los alimentos que exhiben este comportamiento reológico, poseen una estructura interna capaz de impedir el flujo para tensiones de cizallamiento inferiores a un valor inicial. Cuando la

tensión de cizallamiento es mayor que el valor inicial, el material comienza a fluir, caso contrario se comporta como un sólido (Costa, 2006)

El modelo de Bingham ha sido utilizado por algunos autores para describir el comportamiento reológico de pastas de fécula de mandioca (Odigboh & Mohsenin, 1975), de geles de pectina (Fizman et al., 1984)

#### - **Fluidos pseudoplástico**

Son fluidos que se inician el flujo bajo tensiones de cizallamiento infinitesimal. La mayoría de fluidos que manifiestan el comportamiento no newtoniano pertenecen a este grupo. Los fluidos pseudoplástico demuestran una disminución de la viscosidad aparente cuando hay un aumento de la tensión de cizallamiento. Estos fluidos se encuentran en un estado desordenado cuando están en reposo. Por ende, a mayor tensión, mayor será la ordenamiento y consecuentemente menor la viscosidad aparente (Martins, 2009).

#### *2.2.1.2.2 Dependientes del tiempo*

La viscosidad aparente varía no sólo con el esfuerzo de corte, sino que también para un esfuerzo de corte constante, varía el tiempo de duración de la relación de deformación; clasificándose en fluidos Tixotrópicos y reopéticos. Para los primeros, a una velocidad de deformación fija, la viscosidad decrece con el tiempo de cizallado; para los últimos, la viscosidad se incrementa con el tiempo (Rao, 1977; Barbosa-Cánovas, et al., 1993; citados por Cárcamo, 2005).

#### - **Fluidos tixotrópicos**

Los fluidos tixotrópicos son aquellos que presentan un decrecimiento de la viscosidad aparente con el tiempo de aplicación de tensión. Sin embargo, después del reposo,

tienden a retornar a la condición inicial de viscosidad. Se toman como ejemplo de este tipo de fluidos a las pastas de frutas, gelatinas, mantequilla, yogurt, etc. (Possa & Lima, 2000).

- **Fluidos reopécticos**

Los fluidos reopécticos son aquellos que presentan un incremento en la viscosidad aparente con el aumento de la tasa de deformación. Así como los fluidos tixotrópicos, después del reposo el fluido tiende a retornar a su comportamiento reológico inicial. Este tipo de comportamiento no es común en alimentos, pero puede ocurrir en soluciones de almidón altamente concentradas (Costa, 2006)

**2.2.1.2.3 Fluidos 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 KelvinVoigt). 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 más completa y resistente sea esta red, tanto más acusada será la elasticidad; cuanto más fácilmente se desintegre la red, mayor será el componente viscoso. El modelo matemático 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 (Ec. 2).

$$\sigma + \lambda \dot{\sigma} = \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (Ec. 2)$$

$\lambda$  es el tiempo de relajación definido como la relación entre la viscosidad newtoniana ( $\eta$ ) y el módulo de elasticidad ( $\gamma$ ). Este modelo tiene el defecto de ser demasiado restringido,

ya que solamente puede ser aplicado cuando el comportamiento viscoelásticos 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 modelen de forma más apropiada los comportamientos viscoelásticos no lineales. 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 (Cárcamo, 2005).

### **2.2.2 Modelos matemáticos para fluidos alimenticios**

Los modelos matemáticos se emplean para obtener los parámetros reológicos de los fluidos ya que relacionan la tensión de cizallamiento a la tasa de deformación. El uso de estos es necesario debido a que muchos de los fluidos alimenticios presentan un comportamiento no newtoniano. Existen modelos simples como el de la Ley de Newton y otros un poco más complejos como el de Ley de la Potencia o Ostwald De Waele, Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Mizahari e Berk, entre otros.

El modelo conocido como la Ley de la Potencia, es bastante empleado por ser un modelo simple y de amplia aplicación para describir el comportamiento reológico de fluidos alimenticios (Branco & Gasparetto, 2003). La ecuación que representa el modelo es la siguiente Ec. 3:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (Ec. 3)$$

Los autores mencionados anteriormente emplearon este modelo en el estudio del comportamiento reológico de mezclas ternarias de pulpas de mango y jugos de naranja y zanahoria.

El modelo de Bingham se emplea para fluidos que presentan un índice comportamiento de flujo (n) igual a la unidad, que difiere en presencia de una tensión crítica ( $\tau_0$ ), ya que el líquido requiere una tensión de cizallamiento que supere la tensión inicial para comenzar a fluir (Martins, 2009). La Ec. 4 y 5 describe el modelo:

$$\text{Si } \tau > \tau_0 : \tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4})$$

$$\text{Si } \tau \leq \tau_0 : \dot{\gamma} = 0 \dots\dots\dots(\text{Ec. 5})$$

El modelo de Herschel –Bulkley describe el comportamiento de los fluidos no newtonianos. Así mismo, este modelo es la adaptación de la Ley de la Potencia, la diferencia radica en la adición del término tensión crítica ( $\tau_0$ ). La siguiente ecuación (Ec. 6) representa el modelo:

$$\tau = \tau_0 + K_H \cdot (\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots(\text{Ec. 6})$$

Autores como (Sato & Cunha, 2007) emplean este modelo para describir el comportamiento reológico de pulpas ya que esta se comporta como un fluido pseudoplásticos, debido a las interacciones entre sus azúcares, sustancias pécticas y sólidos suspendidos presentes.

El modelo de Casson se desarrolló este modelo para un comportamiento reológico de una suspensión de partículas que interactúan en un fluido newtoniano, el modelo es el siguiente (Ec. 7).

$$(\tau)^{0,5} = (K_{0C})^{0,5} + K_C(\dot{\gamma})^{0,5} \dots\dots\dots(\text{Ec. 7})$$

El modelo de Mizrahi y Berk se basa en un modelo de una suspensión de partículas que interactúan en un disolvente pseudoplástico, se desarrolló de forma que pudiera describir las propiedades de flujo del jugo concentrado de naranja. La función se obtuvo modificando la ecuación de Casson, ya que este modelo no se adaptó a los valores de tasa de deformación de este producto (Mizrahi & Berk, 1972; citada por Cárcamo, 2005). La siguiente ecuación (Ec. 8) representa el modelo:

$$(\tau)^{0,5} = K_{OM} + K_M(\dot{\gamma})^{n_M} \dots\dots\dots(Ec. 8)$$

Cuando un material se corta a una velocidad de cizallamiento constante, la viscosidad de un material tixotrópico disminuirá durante un periodo de tiempo, lo que implica un desglose progresivo de la estructura. Sin embargo, los materiales reopécticos manifiestan el tipo opuesto de comportamiento.

El modelo de Weltman permite explicar el comportamiento observado en diversos alimentos cuando se aplica cizallamiento (Ec. 9)

$$\tau = A_0 + B_0 \cdot \ln t \dots\dots\dots(Ec. 9)$$

El modelo de Figoni y Shoemaker describe la disminución de tensión de cizallamiento por medio de funciones de primer orden (Ec.10)

$$\tau - \tau_e = \sum(\tau_{0i} - \tau_{ei}) \exp(-K_i \theta) \dots\dots\dots(Ec. 10)$$

### **2.2.3 Efecto de diferentes factores sobre la viscosidad aparente e índice de consistencia**

Ortega et al. (2015) mencionan que la temperatura, concentración de sólidos y el efecto combinado de ambos pueden originar variación en la viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ) e índice de consistencia (K) de los alimentos a base de frutas que pueden ser caracterizados

por los modelos de la ley de la potencia, Herschel-Bulkley, Casson, Mizrahi-Berk, entre otros.

### **2.2.3.1 Efecto de la temperatura**

El efecto de la temperatura puede correlacionarse mediante un modelo combinado de la ecuación de Arrhenius para la viscosidad aparente (Ec.11) e índice de consistencia (Ec.12).

$$\eta_{app} = \eta_0 e^{\frac{Ea}{RT}} \dots \dots \dots (Ec.11)$$

$$K = K_0 e^{\frac{Ea}{RT}} \dots \dots \dots (Ec.12)$$

Esta ecuación ha sido utilizada en concentrados de tomate (Harper & Elshahrigi, 1965; Rao et al., 1981), cremogenado de pera (Harper & Lebermann, 1962), pulpa de mango tommy atkins (Ortega, 2015),

### **2.2.3.2 Efecto de la concentración**

El efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente e índice de consistencia es importante en las aplicaciones como en la concentración de fluidos alimentarios (Silva et al., 2005). Relaciones de tipo exponencial conforman a las ecuaciones Ec.13 y 14

$$\eta_{app} = \eta_1 C^\alpha \dots \dots \dots (Ec.13)$$

$$K = aC^b \dots \dots \dots (Ec.14)$$

### **2.2.3.3 Efecto combinado en función de la temperatura y concentración**

El efecto de la temperatura y concentración sobre la viscosidad e índice de consistencia pueden ser determinados a partir de la Ec. 15, 16 y 17

$$\eta_{app} = \delta C^\varepsilon e^{\frac{Ea}{RT}} \dots \dots \dots (Ec.15)$$

$$K = K_1 C^{n_1} e^{\frac{Ea}{RT}} \dots \dots \dots (Ec.16)$$

$$K = K_2 e^{\left(\frac{Ea}{RT} + n_2 C\right)} \dots\dots\dots (Ec.17)$$

## **2.2.4 Reómetros**

### ***2.2.4.1 Reómetros rotacionales***

Para clasificar un fluido reológicamente son necesarios varios datos de tensión de cizallamiento correspondientes a las tasas de deformación para ajustar a un determinado modelo de comportamiento reológico. Las principales ventajas de utilizar los reómetros rotacionales, es que los equipos permiten el uso de pequeñas muestras de productos y proporcionan una medida continua de la relación de la tasa de deformación y la tensión de cizallamiento (Diniz, 2009).

### ***2.2.4.2 Cilindros concéntricos***

El reómetro de cilindros concéntricos es un instrumento que opera en un rango de velocidad de cizallamiento moderado, haciendo de esta una buena opción para la recopilación de datos utilizados en muchos cálculos de ingeniería (Steffe, 1996). Estos dispositivos están diseñados para causar cizallamiento en el fluido situado entre dos cilindros concéntricos, de los cuales uno gira y el otro permanece estacionario para que permitan obtener curvas reológicas (Vidal et al., 2004). La Figura (4 a) muestra un diagrama de cilindro concéntrico.

### ***2.2.4.3 Placas paralelas***

Este tipo de reómetro se compone de dos placas paralelas en forma de disco. El sistema de placa-placa es adecuado para materiales no homogéneos con partículas grandes. La Figura (4 b) muestra un diagrama de placas paralelas.

#### 2.2.4.4 Cono y placa

Estos dispositivos consisten en una placa plana horizontal (esquema estacionario) y un cono invertido (punta con el corte), cuyo vértice está muy cerca de la placa. Sin embargo, en el cálculo de los parámetros reológicos, se considera el cono con la punta entera. La Figura (4 c) muestra un diagrama de cono placa.

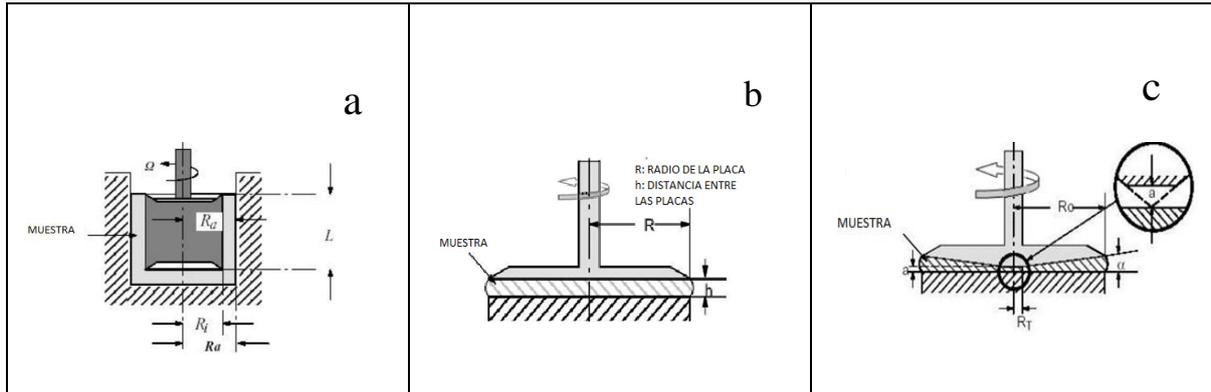


Figura 4. Reómetro rotacional de cilindros concéntricos (a), Reómetro rotacional de placas paralelas (b), Reómetro rotacional de cono y placa (c). (Haminiuk, 2005)

### 2.3 Propiedades termofísicas

La transferencia de energía calorífica es uno de los fenómenos de transporte primordiales en los procesos agroalimentarios. En prácticamente todos los procesos existen etapas en las que los elementos se enfrían o calientan.

Los procesos térmicos, las velocidades y mecanismos de transferencia de calor son muy importantes. Desde un enfoque termodinámico, la transferencia de calor se da en un sistema en el cual se encuentran dos cuerpos que están a diferentes temperaturas, definiéndose como transferencia de energía térmica. En este fenómeno, cualquier variación del calor causará un movimiento de las moléculas de un producto, y la energía cinética de las moléculas se incrementa o disminuye a medida que el calor es absorbido o desprendido;

respectivamente (Miranda & Arthur, 2012). El calor se transmite por conducción, convección, radiación o por combinación de estos.

Dentro de las propiedades termofísicas están: densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica. Nicoletti et. al (2013) mencionan que es importante conocer las propiedades térmicas de alimentos y bebidas para poder realizar los diferentes cálculos implicados en transferencia de calor en el diseño de equipos de almacenamiento y refrigeración, y estimación de tiempos de proceso para refrigeración, congelación, calentamiento, secado u otro proceso unitario realizado en alimentos y bebidas (Alvis et al., 2009). Estas propiedades se ven influenciadas en un mayor o menor grado por la temperatura durante el proceso y la composición del alimento (Guerra et al., 2010).

### **2.3.1 Calor Específico (Cp)**

La definición tradicional de calor específico o capacidad calorífica de un alimento es la medida de la cantidad de energía necesaria por unidad de masa para aumentar un grado de temperatura; expresado en J/kgK.

Esta propiedad es importante en los procesos de transferencia de calor; cuando los alimentos son enfriados o calentados. Es necesario su conocimiento para el cálculo de la energía que hay que suministrar o extraer para llevar al producto desde su temperatura inicial hasta una temperatura final deseada, lo que se conoce como carga térmica o entalpía de proceso (Miranda & Arthur, 2012).

Los calores específicos de los productos alimentarios dependen mucho de su composición. El calor específico del agua en estado líquido tiene un valor mayor que la mayoría de los líquidos, así el calor específico de los alimentos es significativamente afectado por la cantidad de agua presente y el estado físico en el que se encuentre. Los alimentos congelados con alto contenido en agua pueden tener valores de calor específico

de aproximadamente igual a la mitad que los correspondientes en el estado fresco (Sahin & Gülüm, 2009).

Dentro de los métodos aplicados para determinar el calor específico en los alimentos se encuentran: método de la mezcla, método por comparación, método adiabático y método por calorímetro de diferencial de barrido (DSC, siglas en inglés) (Ochoa et. al, 2005). Esta propiedad se ve influenciada por la composición del alimento y factores de procesamiento (temperatura, presión, etc.); los cuales actúan como barreras ante la transferencia de calor (Mattos & Gaspar, 2002).

El calor específico está representado por la siguiente ecuación (Ec. 18):

$$C_p = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (Ec. 18)$$

### 2.3.2 Conductividad térmica

La conductividad es la propiedad que describe la capacidad de un cuerpo para conducir el calor. La conductividad térmica es muy crítica y necesaria a su vez para los diferentes diseños de ingeniería y cálculo de las velocidades de transferencia de calor durante el proceso de calentamiento o enfriamiento. El sistema SI tiene unidades de W/mK (Giraldo et. al, 2010).

En sólido puede estar formado por electrones libre y átomos enlazados en una disposición periódica denominado retícula. La energía térmica se transporta a través de moléculas como resultado de dos efectos: las ondas de retícula y los electrones libres.

En sólidos porosos tales como los alimentos, esta propiedad depende principalmente de la composición del alimento; también influyen factores como fracción de huecos, de la forma, del tamaño y disposición de espacios vacíos, del fluido contenido en los poros y de la homogeneidad (Sahin & Gülüm, 2009).

La conductividad térmica está relacionada con el contenido de humedad. Las conductividades térmicas de los materiales alimentarios varían entre el valor de la conductividad del agua ( $k_{\text{agua}}= 0.614 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) y el valor para el aire ( $k_{\text{aire}}=0.026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ); ambos medidos a  $27^\circ\text{C}$  (Ibarz & Barbosa, 2005).

Para medir esta propiedad existen métodos divididos en dos categorías, aquellos que se ejecutan en condiciones de transferencia de calor en estado estacionario y aquellas que se ejecutan en estado no estacionario. Los métodos utilizados en estado no estacionario son: el pulso de calor, la sonda caliente y la banda caliente; se usa una fuente de calor o más. Y en estado estacionario son: método de flujo de calor longitudinal o radial, método de calor de vaporización, método de densidad de calor y calorímetro diferencial de barrido (DSC) (Sahin & Gülüm, 2009). A continuación se presenta la ecuación que describe la conductividad térmica (Ec. 19):

$$k = \frac{Q}{x\Delta T} \dots\dots\dots (Ec. 19)$$

### 2.3.3 Difusividad térmica

La difusividad térmica es una propiedad física asociada con el caudal de calor en estado no estacionario. Es una propiedad derivada y mide la capacidad de un cuerpo para conducir energía térmica relativa a su capacidad de almacenar energía. En otras palabras, describe la rapidez con la que un alimento reacciona al cambio de temperatura; cuanto más alto sea el valor de difusividad más rápida será la reacción a los cambios de su medioambiente termodinámico. En el sistema SI la unidad de la difusividad es de  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Esta propiedad debe ser conocida con el fin de predecir, crear, optimizar, adecuar o simular un proceso, además de simular campos de temperatura y diseñar máquinas

especializadas; y está influenciada por las características específicas del alimento (Guerra et al., 2010).

La difusividad térmica relaciona la conductividad térmica y el calor específico del alimento multiplicado por la densidad del mismo (Ec. 20).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \dots \dots \dots (Ec. 20)$$

### 2.3.4 Métodos de análisis térmicos

Lasanta (2013) menciona que los análisis térmicos abarcan un gran número de técnicas que permiten la determinación de las propiedades termofísicas de los alimentos, sustancias o materiales en función a la variación de temperatura. La ejecución de estas técnicas es posible cuando las muestras se encuentran en un sistema de temperatura controlada. Se conocen más de una docena de métodos térmicos que pueden ser clasificación por las propiedades que miden y por los rangos de temperatura en los que se ejecutan (Tabla 7). Estos métodos pueden ser empleados en el control de calidad de alimentos o empaques, temas de investigación e innovación de productos alimenticios.

El calor puede tener diversos efectos sobre un alimento; modificando sus propiedades características; y esos cambios son estudiados en los análisis térmicos, por ejemplo: la variación de peso es estudiado por la Termogravimetría (TG), mientras que la medida de los cambios de energía es la base del análisis térmico diferencial (ATD) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Tabla 7. Clasificación de los métodos de análisis térmico (Lasanta ,2013)

<b>Tipo</b>	<b>Nombre de método</b>	<b>Abreviación</b>
General	Análisis térmico	
	Métodos asociados con cambio de masa	
Estacionario	Determinación de cambios de masa a P=cte.	TA
	Determinación de cambios de masa a T=cte.	
Dinámico	Termogravimetría	TG
	Derivada de Termogravimetría	DTG
Volátiles	Detección de gases desarrollados	EGD
	Análisis de gases desarrollados	EGA
Cambios de temperatura	Determinación de curvas de calentamiento	
	Curvas de velocidad de calentamiento	
	Curvas inversas de velocidad de calentamiento	DTA
	Análisis térmico diferencial	
	Derivada del análisis térmico diferencial	
Cambios de entalpia	Calorimetría diferencial de barrido	DSC
Cambios Dimensionales	Termodilatometría	
	Derivada de las Termodilatometría	TMA
	Análisis termomecánico	

### ***2.3.4.1 Métodos por cambios de entalpia***

#### ***2.3.4.1.1 Calorimetría***

La calorimetría puede ser definida como la medida del calor, debido a que los procesos físicos, químicos y biológicos están estrechamente ligados a la absorción o liberación de calor, la medida del calor proporciona información relevante sobre la forma en la que se desarrollan los procesos, informa si se da un proceso exotérmico (liberación de calor) o endotérmico (absorción de calor), y el tiempo que duran estos. Dicho de otra forma, la calorimetría es una técnica en la que se puede medir de forma precisa cantidades de calor.

#### ***2.3.4.1.2 Tipos de calorímetros***

El calorímetro es un instrumento cuyo funcionamiento se basa en medir las cantidades de calor suministrados o recibidos por los cuerpos. En otras palabras, es útil para determinar el calor específico de un cuerpo, así como para medir las cantidades de calor que liberan o absorben los cuerpos en reacciones químicas o cambios físicos.

#### ***2.3.4.1.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)***

Dentro de los métodos de análisis térmicos se encuentra el método de calorimetría diferencial de barrido, (sus siglas en inglés: DSC). Según Kodre et al. (2014) la técnica del DSC es una de las técnicas más usadas para la evaluación de las transiciones de fase en compuestos inorgánicos, polímeros y alimentos. Así mismo, Coello & Garcés (2012) mencionan que la calorimetría diferencial de barrido permite el estudio de los procesos en los que se produce una variación de entalpía como puede ser la determinación de calores específicos, puntos de ebullición y cristalización, pureza de compuestos cristalinos, entalpías de reacción y determinación de otras transiciones de primer y segundo orden.

El objetivo del DSC, según Kodre et al. (2014), es evaluar las transformaciones físicas y químicas en función al flujo calórico que es suministrado a la materia en estudio. Esto se da debido a un diferencial de entalpía que existe entre una cápsula que contiene la muestra en estudio y otra cápsula vacía que sirve de referencia. El DSC mide la energía necesaria suministrada a la cápsula que contiene la muestra en estudio para mantenerla a la misma temperatura de la cápsula “referencia”; la cual es de composición conocida y no sufre modificaciones durante la variación de temperatura (Lasanta, 2013).

Un calorímetro diferencial de barrido (DSC) es un equipo que consta de dos calentadores individuales y un controlador que permite la regulación del flujo de calor y

controlar la temperatura. Lauro et al. (2000) mencionan que en un DSC, la muestra en estudio y la muestra de referencia se someten a calentamiento en las piletas metálicas, la temperatura de la muestra en estudio y del material referente se mantienen iguales variando la potencia de los calentadores (Figura 5) (Gómez, 2009). El calorímetro diferencial de barrido proporciona un flujo calórico, a una velocidad constante, a la muestra y a un material de referencia. Se conoce que la transmisión de calor se da de forma instantánea, razón por la cual se trabaja con pequeñas cantidades de muestra. Las muestras son colocadas en cápsulas selladas herméticamente, lo cual protegerá la muestra e impedirá algún cambio en la humedad de esta; este es un factor importante para la determinación de la transición, ya que la cantidad de agua influye en la temperatura a la cual se puede dar los cambios.

Granados (2015) menciona que lo que se puede registrar en los experimentos con el DSC es la diferencia en el flujo de calor que se suministra a la muestra y a la referencia para poder mantenerlas a la misma temperatura. Existe una diferencia en el flujo de calor suministrado que es proporcional a la diferencia de capacidades caloríficas de la muestra y de la referencia.

Por lo general, el DSC puede trabajar en un intervalo de temperaturas que va desde la temperatura más baja (similar a la del nitrógeno líquido) hasta unos 600 °C. Debido a que la energía térmica es exactamente equivalente en magnitud a la energía absorbida o liberada en la transición, el balance de energía proporciona una medición calorimétrica directa de la energía de la transición. (Coello & Garcés, 2012). A su vez, Coello & Garcés (2012) mencionan que la cantidad de energía que es medida mediante el DSC se ve reflejada a través de un gráfico de flujo de calor y temperatura conocido como “Termograma”.

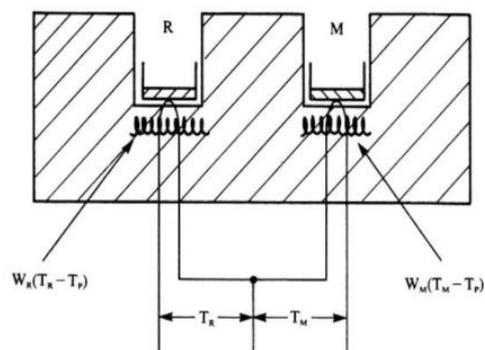


Figura 5. Esquema de DSC (Coello & Garcés, 2012).

El resultado de los análisis es una gráfica a medida que aumenta la temperatura. En el eje X se presenta los valores de la temperatura, mientras que en el eje Y se presenta la diferencia de calor entre los dos calentadores a una temperatura dada.

Cuando inicia el experimento con el funcionamiento del equipo, la muestra y la referencia se empiezan a calentar en las dos cápsulas, el equipo refleja el calor absorbido por la muestra de alimento frente a la temperatura. La gráfica al inicio del calentamiento muestra un comportamiento de manera constante. El flujo de calor está dado en unidades de calor (J/s), calor ( $q$ ) suministrado por unidad de tiempo, lo que se ve definido en la siguiente ecuación (Ec. 21)

$$\frac{q}{t} = \text{calor} / \text{tiempo} = \text{flujo de calor} \dots \dots \dots (Ec. 21)$$

La velocidad de calentamiento es proporcional a la temperatura ( $T$ ) por unidad de tiempo ( $t$ ), según se muestra en la ecuación 20:

$$\frac{\Delta T}{t} = \text{variación de la temperatura} / \text{tiempo} = V. \text{ calentamiento} \dots \dots \dots (Ec. 22)$$

El flujo de calor ( $q/t$ ) dividido para la velocidad de calentamiento ( $\Delta T/t$ ) da como resultado a la cantidad de calor que se necesita para conseguir un aumento de temperatura, lo que también es conocido como capacidad calorífica (Ec. 22)

$$\frac{q}{\Delta T} = C_p = \text{Capacidad Calorífica} \dots\dots\dots(\text{Ec.23})$$

El calorímetro diferencial de barrido además de determinar la capacidad calorífica, permite la medición de las temperaturas de las etapas de transición vítrea, cristalización, fusión. Sin embargo, no todas las fases están presentes en cada termograma, ya que esto depende de la composición y estructura de la muestra. En el caso de los alimentos, los diagrama de estados son considerados mapas que ayudan a determinar en qué estado se encuentran en función del contenido de agua o sólidos y de la temperatura alcanzada.

**2.3.4.1.4 Factores que afectan su medición**

Cada una de las propiedades termofísicas mencionadas en párrafos anteriores se ven afectadas por diversos factores durante su medición, tales como: contenido de humedad, temperatura y composición (porosidad, etc.), así como también los componentes del alimento en estudio; esto debido a la gran variabilidad y características de los alimentos, según lo mencionado por Dantas et al. (2007) .Los principales componentes que se consideran en los alimentos son: proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y cenizas. (Gokdogan et al., 2015).

El cálculo de las propiedades térmicas es más efectivo y preciso si es que estas son evaluadas en las condiciones tal cual son los procesos y modelos.

**2.3.4.1.5 Aplicaciones de las propiedades termofísicas**

Según Martins (2009), el conocimiento de las propiedades termofísicas de los alimentos son parámetros de gran necesidad cuando se realiza cálculos de transferencia de calor para los diferentes procesos que se usan dentro de la industria alimentaria, tales como calentamiento y enfriamiento de alimentos. Además, son datos esenciales en el diseño de equipos, y dentro de la ingeniería de alimentos; todo ellos con el fin de reducir costos de operación y garantizar una correcta calidad final de los alimentos.

En la Tabla 8 se presenta las aplicaciones más comunes del calorímetro diferencial de barrido dentro del área de la industria alimentaria.

Tabla 8. Aplicaciones del DSC en la industria alimentaria (Coello & Garcés, 2012)

Tipo de muestra	Tipo de información
Aceites, grasas y alimentos untables	Temperatura inicial de Fusión/ Cristalización/ Comportamiento polimórfico. Estabilidad a la oxidación
Harinas y almidón de arroz	Retrogradación / Gelatinización / Transición Vítreo ( $T_g$ )
Polvos vegetales	Transición Vítreo ( $T_g$ )
Pastas y geles que contiene polisacáridos o gomas	Calor específico ( $C_p$ ), temperatura inicial de fusión y cristalización
Proteínas	Desnaturalización/ Agregación
Azúcares	Temperatura de Cristalización/ Fusión/ Transición Vítreo
Productos Congelados	Transición Vítreo/ Temperatura de Cristalización( Estabilidad de fase congelación

## **CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Lugar de ejecución**

El presente trabajo fue realizado en el Centro de Investigación en Tecnología de Alimentos (CITAL), perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión (UPeU) y en los laboratorios de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

### **3.2 Materiales e insumos**

#### **3.2.1 Materia prima**

El aguaymanto (*Physalis peruviana*) y sanky (*Corryocactus brevistylus*), se obtuvieron del departamento de Ancash y Ayacucho, respectivamente.

#### **3.2.2 Insumos**

- Sacarosa (Azúcar Blanca, marca “Cartavio”)

#### **3.2.3 Materiales**

- Matraces de Erlenmeyer de 125 ml
- Bureta de 50 ml
- Probeta de 100 ml
- Vaso precipitado de 100 ml
- Pipetas de 10 ml

#### **3.2.4 Equipos**

- Balanza analítica (Marca: Pionner / Modelo: Ítem PA21/ Capacidad: 210 g)

- Estufa (Marca: Memmert/ Serie: C2100706)
- Potenciómetro (Marca: Hanna)
- Refractómetro
- Termómetro
- Calorímetro diferencial de barrido (DSC) (Modelo NETZSCH STA 449F3)
- Viscosímetro (Modelo: ST –DIGIT-R)

### **3.2.5 Reactivos**

- Hidróxido de sodio (NaOH) al 1N
- Agua destilada.
- Fenolftaleína

### **3.3 Metodología experimental**

En la Figura 6 se detalla el procedimiento para la determinación de las propiedades termofísicas y parámetros reológicos en las pulpas aguaymanto y sanky.

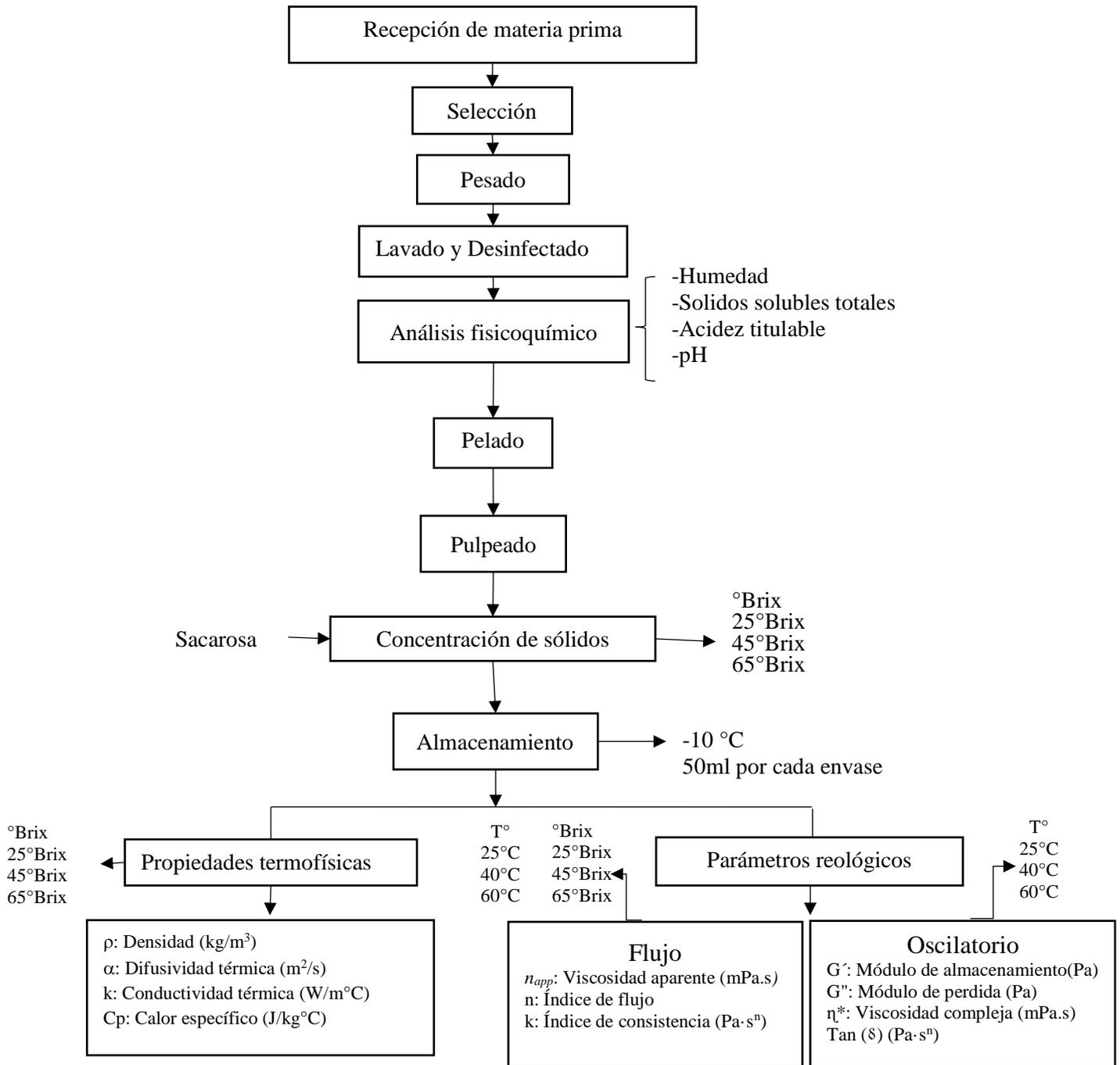


Figura 6. Flujograma del experimento para la determinación propiedades termofísicas y parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.

La etapa de producción de pulpa de aguaymanto y sanky (Figura 6) se realizó de la siguiente manera:

- a. Recepción de Materia Prima: Se recibió y cuantificó toda la fruta que entró en el proceso. Para esta operación se usó recipientes adecuados.
- b. Selección: Se eliminó la fruta que no tuvo el grado de madurez adecuado o que presentaba golpes o magulladuras. En el caso del aguaymanto, también se le extrajo el cáliz o capacho.
- c. Pesado: Se pesará la fruta para conocer el peso inicial de la MP.
- d. Lavado y desinfectado: Se hace para eliminará bacterias superficiales, residuos de insecticidas y suciedad adherida a la fruta. Se usará agua con hipoclorito de sodio al 5%.
- e. Pelado: En el caso del sanky, se realizó un pelado manual.
- f. Pulpeado: Se realizó en una pulpeadora marca INNOVA, con un tamiz de 0.5 mm
- g. Concentración de sólidos: Se añadió sacarosa a la pulpa de cada fruta, dependiendo del tratamiento: 25, 45 y 65 °Brix.
- h. Almacenamiento: Se almacenó 50ml de las pulpas de cada tratamiento en bolsas de polietileno a -10°C.

### **3.3.1 Análisis fisicoquímico de las frutas: Aguaymanto y Sanky**

#### ***3.3.1.1 Humedad***

Se determinó por el método gravimétrico: AOAC, 934.06.

#### ***3.3.1.2 Acidez titulable***

Se realizó por el método: AOAC, 942.15.

#### ***3.3.1.3 Sólidos solubles totales (°Brix)***

Se realizó por el método: AOAC, 932.12.

#### ***3.3.1.4 pH***

Se realizó por el método: AOAC, 981.12.

### **3.3.2 Determinación de los parámetros reológicos**

#### ***3.3.2.1 Ensayo de flujo***

La determinación de los parámetros reológicos se efectuó en un reómetro rotacional (marca: Thermo scientific, modelo: HAAKE™ Viscotester™ iQ). Se inició vertiendo 18 ml de la muestra, en el cilindro contenedor, hasta la marca establecida. Se introdujo el husillo de cilindros concéntricos CC25 DINTI; posteriormente, se programó la temperatura de análisis (25, 40 y 60°C), tiempo de barrido (10 min) y velocidad de rotación (0 a 100 s<sup>-1</sup>) en el software del equipo. Culminada la lectura se procedió a tomar los valores numéricos de la velocidad (s<sup>-1</sup>) y esfuerzo de corte (Pa) para insertarlos en el programa Microsoft Excel 2016. El proceso de determinación se ejecutó de la misma forma para cada muestra (25, 45 y 65°Brix), por duplicado. Finalmente, se obtuvieron los valores del índice de flujo (n) e índice de consistencia (k) a partir de los reogramas de los modelos matemáticos Ostwald de

Waele o Ley de la potencia (Ec. 24), Hershel-Bulkley (Ec.25) y Casson(Ec.26) (Silva et. al, 2014).

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots(Ec.24)$$

$$\tau = \tau_0 + K_H \cdot (\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots(Ec.25)$$

$$(\tau)^{0,5} = (K_{0C})^{0,5} + K_C(\dot{\gamma})^{0,5} \dots\dots\dots(Ec.26)$$

El ajuste de los modelos matemáticos, sobre los datos experimentales, fue evaluado mediante el coeficiente de regresión ( $R^2$ ), suma de los errores cuadrados (SSE), raíz media de los errores cuadrados (RMSE), error medio estimado (EME) y el parámetro chi-cuadrado ( $\chi^2$ ), Ec. 27, 28, 29 y 30 respectivamente. Los valores más bajos o que tiendan a 0 de SSE, RMSE, EME y  $\chi^2$ , junto con los valores de  $R^2$  que tiendan a 1, se consideran como óptimos y ayudan a elegir el mejor modelo. El programa empleado para el cálculo de los errores fue el Microsoft Excel 2016.

$$SSE = \frac{1}{n} \sum (y_e - y_c)^2 \dots\dots\dots(Ec. 27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_e - y_c)^2} \dots\dots\dots(Ec. 28)$$

$$EME = \sqrt{\frac{\sum (y_e - y_c)^2}{GLM}} \dots\dots\dots(Ec. 29)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (y_e - y_c)^2}{N - m} \dots\dots\dots(Ec. 30)$$

Los datos experimentales de ambas pulpas se ajustaron a los modelos expresados por las Ec. 31, 33, 35 y 36 para modelar el índice de consistencia (K) y las Ecuaciones 32, 34 y 37 para modelar la viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ), ambos parámetros frente a la temperatura, concentración y a los efectos combinados de la temperatura y concentración (Steffe, 1996; citado por Ortega et al. 2015)

- Efecto de la temperatura

$$K = K_0 e^{\frac{Ea}{RT}} \dots\dots\dots (Ec.31)$$

$$\eta_{app} = \eta_0 e^{\frac{Ea}{RT}} \dots\dots\dots (Ec.32)$$

- Efecto de la concentración

$$K = aC^b \dots\dots\dots (Ec.33)$$

$$\eta_{app} = \eta_1 C^\alpha \dots\dots\dots (Ec.34)$$

- Efecto combinado en función de la temperatura y concentración

$$K = K_1 C^{n_1} e^{\frac{Ea}{RT}} \dots\dots\dots (Ec. 35)$$

$$K = K_2 e^{\left(\frac{Ea}{RT} + n_2 C\right)} \dots\dots\dots (Ec.36)$$

$$\eta_{app} = \delta C^\varepsilon e^{\frac{Ea}{RT}} \dots\dots\dots (Ec.37)$$

### 3.3.2.2 Ensayos oscilatorios

La determinación de las propiedades viscoelásticas se realizó en el mismo reómetro con un usillo plato-plato, en el cual se introdujo 2 ml de cada una de las muestras de aguaymanto y sanky a 65°Brix. Se evaluó los módulos de almacenamiento ( $G'$  y  $G''$ ), viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) y Tan ( $\delta$ ) a tres diferentes temperaturas (25, 40 y 60 °C) con la frecuencia en un rango de 0.1 a 100 Hz (Silva et. al, 2013).

### 3.3.3 Determinación de las propiedades termofísicas.

Se concentró las pulpas de las frutas a 25, 45 y 65 °Brix y se procedió a determinar las propiedades termofísicas de cada muestra.

### 3.3.3.1 Determinación de la densidad

La densidad de la pulpa de aguaymanto y sanky fue determinada a tres concentraciones (25, 45 y 65 °Brix) y temperaturas desde -20 a 100 °C. Para las muestras sometidas a temperaturas mayores a 0 °C se aplicó el método de picnometría, y fueron realizadas por triplicado. Se pesó en una balanza analítica la pulpa de fruta, de los diferentes tratamientos, contenido en un picnómetro volumétrico estándar. La temperatura de la muestra se equilibró en baño maría con termostato. Previamente el picnómetro de 10 ml se calibró con agua destilada a cada temperatura estudiada (Ec. 38).

Las muestras sometidas a temperaturas menores a 0 °C, la densidad se obtuvo por el método de desplazamiento de agua: la división de la masa de la muestra entre el volumen de la misma (Ec. 39). Las muestras fueron congeladas en forma de cubos y luego pesadas en una balanza analítica para obtener la masa, mientras que el volumen se obtuvo por desplazamiento de agua destilada medido en una probeta de 100 ml (Machado & Vélez, 2008).

$$\rho_{muestra} = \frac{P_m - P_v}{P_{H_2O} - P_v} \rho_{(H_2O)_T} \dots\dots\dots (Ec. 38)$$

$$\rho_{muestra} = \frac{m}{v} \dots\dots\dots (Ec. 39)$$

### 3.3.3.2 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Se calculó el calor específico de las muestras mediante el DSC modelo NETZSCH STA 449F3, usando el software calorimeter. Para ello se usó 18 mg y 14 mg de muestra de las pulpas de los diferentes tratamientos para aguaymanto y sanky respectivamente. Las muestras fueron pesadas y colocadas en las cápsulas propias del DSC, y por presión fueron selladas para evitar una pérdida de muestra durante el proceso. Se colocó la muestra junto con la cápsula de referencia (cápsula vacía) en el equipo. El rango de temperatura

programado fue de -20°C hasta 100°C; temperaturas que simulan los procesos industriales; y se dieron en un rango de incremento de 10°C por 1 min (Coello & Garcés, 2012).

Una vez terminado el proceso de análisis se obtuvieron las curvas de barrido (termogramas) junto con el flujo de calor. Partiendo del flujo de calor en la muestra, se calculó el calor específico ( $C_p$ ) aplicando la Ec. 40, en la cual se relaciona el flujo de calor hacia las cápsulas con la variación de temperatura. La conductividad térmica también se obtuvo de los datos proporcionados por el calorímetro (Ec. 41). Con el dato de calor específico obtenido y la conductividad, se calculará la conductividad difusividad térmica (Ec. 42).

$$C_p = \frac{q}{\Delta T} \left( \frac{J}{kg^{\circ}C} \right) \dots\dots\dots(Ec. 40)$$

$$k = \frac{L\Delta q}{A(T_f - T_0)} \left( \frac{W}{mK} \right) \dots\dots\dots(Ec. 41)$$

$$\alpha = - \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{m^2}{s} \right) \dots\dots\dots(Ec. 42)$$

### 3.3.3.3 Propiedades termofísicas teóricas

Choi & Okos (1986) propusieron las siguientes ecuaciones para el cálculo de las propiedades termofísicas basado en su composición, al cual se conoce como cálculo teórico.

Para el calor específico de cada componente fueron propuestas las siguientes ecuaciones:

$$C_{p \text{ proteínas}} = 2008.2 + 1208.9 * 10^{-3}T - 1312.9 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(Ec. 43)$$

$$C_{p \text{ lípidos}} = 1984.2 + 1473.3 * 10^{-3}T - 4800.8 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(Ec. 44)$$

$$C_{p \text{ carbohidratos}} = 1548.8 + 1962.5 * 10^{-3}T - 5939.9 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(Ec. 45)$$

$$C_{p \text{ fibra}} = 1845.9 + 1930.6 * 10^{-3}T - 4650.9 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(Ec. 46)$$

$$C_{p \text{ cenizas}} = 1092.6 + 1889.6 * 10^{-3}T - 3681.7 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 47)$$

Por lo tanto, el calor específico del alimento se puede predecir a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{p \text{ alimento}} = \sum(Cp_i * X_{mi}) \dots\dots\dots (Ec. 48)$$

Para determinar la densidad de cada componente fueron propuestas las siguientes ecuaciones:

$$\rho_{\text{agua}} = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2 \dots\dots\dots (Ec. 49)$$

$$\rho_{\text{proteinas}} = 1329.9 - 0.51814T \dots\dots\dots (Ec. 50)$$

$$\rho_{\text{lípidos}} = 925.59 - 0.41757T \dots\dots\dots (Ec. 51)$$

$$\rho_{\text{carbohidratos}} = 1599.1 - 0.31046T \dots\dots\dots (Ec. 52)$$

$$\rho_{\text{fibra}} = 1311.5 - 0.36589T \dots\dots\dots (Ec. 53)$$

$$\rho_{\text{cenizas}} = 2423.8 - 0.28063T \dots\dots\dots (Ec. 54)$$

Le ecuación propuesta para el cálculo de la densidad del alimento es la siguiente:

$$\rho_{\text{alimento}} = \sum(\rho_i * X_{mi}) \dots\dots\dots (Ec. 55)$$

Las siguientes ecuaciones fueron propuestas para el cálculo de la conductividad térmica de cada componente:

$$k_{\text{agua}} = 0.57109 + 0.0017625T - 6.7376 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 56)$$

$$k_{\text{proteinas}} = 0.1788 + 0.0011958T - 2.7178 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 57)$$

$$k_{\text{lípidos}} = 0.1807 - 0.0027604T - 1.7749 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 58)$$

$$k_{\text{carbohidratos}} = 0.2014 + 0.0013874T - 4.3312 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 59)$$

$$k_{fibra} = 0.18331 + 0.0012497T - 3.1683 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 60)$$

$$k_{agua} = 0.57109 + 0.0017625T - 6.7376 * 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots (Ec. 61)$$

Por lo cual, la conductividad térmica del alimento puede ser calculada a partir de las siguientes ecuaciones:

$$k_{alimento} = \sum(k_i * X_{vi}) \dots\dots\dots (Ec. 62)$$

$$X_{vi} = (X_i * \frac{\rho_{alimento}}{\rho_i}) \dots\dots\dots (Ec. 63)$$

La difusividad térmica teórica fue calculada con la Ec. 42, la cual relaciona la conductividad, densidad y calor específico.

### 3.4 Análisis Estadístico

#### 3.4.1 Análisis de los parámetros reológicos

Se aplicó un diseño factorial 3<sup>2</sup> para la determinación de los parámetros reológicos; en este diseño las variables independientes fueron la temperatura de tratamiento (25, 40 y 60 °C) y concentración de sólidos totales (25, 45 y 65 °Brix). En la tabla 9 se muestra los tratamientos y variables respuesta (n<sub>app</sub>, n y k).

Así mismo, se empleó un diseño completamente aleatorio (DCA) para los ensayos oscilatorios. La variable independiente fue la temperatura (25, 40 y 60 °C) y las variables respuesta fueron los módulos oscilatorios (G' y G''), viscosidad compleja (η\*) y Tan (δ). El diseño estadístico se puede observar en la Tabla 10. Se estableció un intervalo de confianza a un nivel del 95% y un error (α) de 0.05. Asimismo, se empleó el programa estadístico Statistic 7.0 y Minitab para el análisis de los parámetros reológicos y viscoelásticos respectivamente.

Tabla 9. Diseño factorial 3<sup>2</sup> para la determinación de los parámetros reológicos

<i>N° tratamientos</i>	<i>Temperatura de tratamiento (°C)</i>	<i>Concentración de sólidos totales (°Brix)</i>	<i>Viscosidad aparente (<math>\eta_{app}</math>: mPa.s)</i>	<i>Índice de flujo (n)</i>	<i>Índice de consistencia (K : Pa·s<sup>n</sup>)</i>
1	25	25			
2	25	45			
3	25	65			
4	40	25			
5	40	45			
6	40	65			
7	60	25			
8	60	45			
9	60	65			

Tabla 10. DCA para la determinación de los parámetros Viscoelásticos

<i>N° tratamientos</i>	<i>Temperatura de tratamiento (°C)</i>	<i>Módulo de almacenamiento (G':Pa)</i>	<i>Módulo de perdida (G'':Pa)</i>	<i>Viscosidad compleja (<math>\eta^*</math> :mPa.s)</i>	<i>Tan(<math>\delta</math>)</i>
1	25				
2	40				
3	60				

### 3.4.2 Análisis de las propiedades termofísicas

Se aplicó un diseño completamente aleatorio (DCA) para el estudio de las propiedades termofísicas donde la variable independiente fue la concentración de sólidos totales con tres niveles: 25, 45, 65 °Brix. En la Tabla 11 se muestra los tratamientos que se realizaron junto con las variables respuesta que fueron cuatro: densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica de la pulpa de sanky y aguaymanto. Cada análisis se realizó por triplicado. Para este análisis se estableció un intervalo de confianza a un nivel del 95% y un error ( $\alpha$ ) de 0.05. Asimismo, se empleó el programa estadístico Minitab.

Tabla 11. DCA para la determinación de las propiedades termofísicas

<i>N° tratamientos</i>	<i>Concentración (°Brix)</i>	<i>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Calor especifico (J/kgK)</i>	<i>Conductividad térmica (W/mK)</i>	<i>Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)</i>
<b>1</b>	25				
<b>2</b>	45				
<b>3</b>	65				

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Análisis fisicoquímicos

Se analizó fisicoquímicamente la pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis Peruviana*) y los resultados fueron reportados en la Tabla 12.

Tabla 12. Análisis fisicoquímico de la pulpa de sanky (*Corryocactus brevistylus*) y aguaymanto (*Physalis peruviana* L.).

Fuente	Humedad (%)	Acidez (% de ácido cítrico)	Sólidos solubles (°Brix)	pH
<b><i>Sanky (Corryocactus brevistylus)</i></b>				
Propia (experimental)	91.26 ± 0.97	2.70 ± 0.01	2.88 ± 0.12	3.30 ± 0.20
Nolazco & Guevara, 2009	95.2	2.3	2.9	2.7
Evangelistica & Rivas, 2015	-	2.69 ± 0.07	3.4 ± 0.25	2.95 ± 0.03
Málaga & Rodríguez, 2014	-	6.4	5	2.5
Carpio & Figueroa, 2017	-	2.45	4	2.5
Arevalo et al., 2012	-	-	2.9	3.05
Matos et al., 2015	94.3	-	-	3.1
<b><i>Aguaymanto (Physalis Peruviana L.)</i></b>				
Propia (experimental)	78.85 ± 1.20	1.60 ± 0.06	12.80 ± 0.30	3.33 ± 0.03
Pauro, 2016	80.80 ± 0.02	2.28 ± 0.03	12.50 ± 0.05	4.08 ± 0.01
Mendoza et al, 2012	78.90	2.00	13.00	3.72
Marín et al., 2010	-	2.05	14.30	3.39
Márquez et. al, 2009	-	2.40	12.50	3.56
Restrepo et. al, 2009	-	2.10	13.80	3.39
Castro et. al, 2008	87.00	1.97	14	3.60
Encina, 2005	80.00 ± 0.02	2.28 ± 0.03	12.5 ± 0.5	4.08 ± 0.01

En la pulpa de aguaymanto se encontró una humedad de  $78.85 \pm 1.20$  %, valor próximo al 78.90 % registrado por Mendoza et. al (2012), dentro del rango de  $80 \pm 0.02$ % obtenido por Encina (2005) y por debajo del  $80.80 \pm 0.02$ %, 85.80 % y 87.00% y reportados por Pauro (2016), Guevara & Málaga (2013) y Castro et. al (2008), respectivamente. El valor de acidez titulable obtenido fue de  $1.60 \pm 0.06$  y un pH de  $3.33 \pm 0.03$ , valores menores a los que fueron reportados por Pauro (2016), Mendoza et. al (2012), Marín et. al (2010), Márquez et. al (2009), Restrepo et. al (2009), Castro et. al. (2008) y Encina (2005). El

contenido de sólidos solubles (°Brix) fue de  $12.80 \pm 0.30$ , valor que coincide con los rangos obtenidos por Pauro (2016), Márquez et. al (2009) y Encina (2015); sin embargo, es menor a lo reportado por Mendoza et. al (2012), Marín et. al (2010), Restrepo et. al (2009) y Castro et. al. (2008). El valor de °Brix, pH y % Acidez del aguaymanto es mayor al de otros berries (bayas) andinos, pues García et. al (2010) reportaron 10 °Brix, pH de 2.5 y 0.2% acidez para la zarzamora o arándano. Respecto a la pulpa de sanky, se obtuvo un pH de  $3.30 \pm 0.20$ , el cual se encontró por encima de  $2.95 \pm 0.03$  reportado por Evangelística & Rivas (2015), 2.5 obtenido por Carpio & Figueroa (2017) y Málaga & Rodríguez (2014) y 2.7 conseguido por Nolzco & Guevara (2009). Así mismo, el valor obtenido es similar al reportado por Arevalo et al. (2012) y Matos et al. (2015). Sin embargo, el pH del sanky es menor en comparación al de la tuna (familia de la cactáceas) ya que Arevalo et al. (2012) reportó un valor de 4.7. Los bajos niveles de pH en los alimentos generan barreras en la conservación (Barbosa-Canovas et al., 1999; citado por Nolzco & Guevara, 2009). El valor de  $2.88 \pm 0.12$  fue obtenido para los sólidos solubles (°Brix), el cual coincide con el obtenido por Nolzco & Guevara (2009) y Arevalo et al. (2012). El incremento de los sólidos solubles presentes en el jugo de una fruta cítrica son un índice del grado de madurez de la misma.  $2.70 \pm 0.01$ , fue la acidez del sanky expresada en ácido cítrico. El valor obtenido fue similar a  $2.69 \pm 0.07$  y 2.45 reportados por Evangelística & Rivas (2015) y Carpio & Figueroa (2017) respectivamente. No obstante, fue menor al descrito por Málaga & Rodríguez (2014). Además, los análisis indicaron una humedad de  $91.26 \pm 0.97$  %. Los valores obtenidos para los frutos en estudio se encuentran dentro del rango de humedad de la mayoría de frutas y hortalizas (80 a 95%) (Wills et al., 1994)

## **4.2 Comportamiento reológico de la pulpa de aguaymanto y sanky**

### **4.2.1. Índice de Consistencia (k) e Índice de flujo (n)**

En las Figuras 7 y 8 se muestran los reogramas de la pulpa de sanky a 25, 45 y 65 °Brix, las curvas de flujo presentadas manifiestan una tendencia pseudoplástica debido a la influencia de la concentración y temperatura sobre el esfuerzo de corte. A bajas temperaturas (25°C) y altas concentraciones (65°Brix) el esfuerzo de corte se incrementó, y a altas temperaturas (60°C) y bajas concentraciones (25°Brix) el esfuerzo de corte disminuyó. Como se observa en los reogramas, la pulpa de sanky requirió un mayor esfuerzo de corte en comparación al aguaymanto, ya que la composición y estructura de ambas pulpas son completamente distintas en estado natural debido a la presencia de mucilagos en el sanky.

Bhandari et al. (2002) mencionan que las propiedades de flujo de las pulpas son influenciadas por la naturaleza de la pectina y cantidad de partículas dispersas, además la ruptura de la estructura reticular de las moléculas de polisacáridos durante el proceso de cizallamiento es la razón por la cual se desarrolla el comportamiento pseudoplástico. Ocampo et. al (2012) indica que, en un sistema reticular, las interacciones moleculares existentes poseen una velocidad de ruptura mayor a la de reformación con el aumento de la velocidad de deformación. Por lo tanto, la viscosidad disminuye ya que existe una menor resistencia al flujo. Este comportamiento se aprecia en mayor medida en el aguaymanto, a diferencia del sanky.

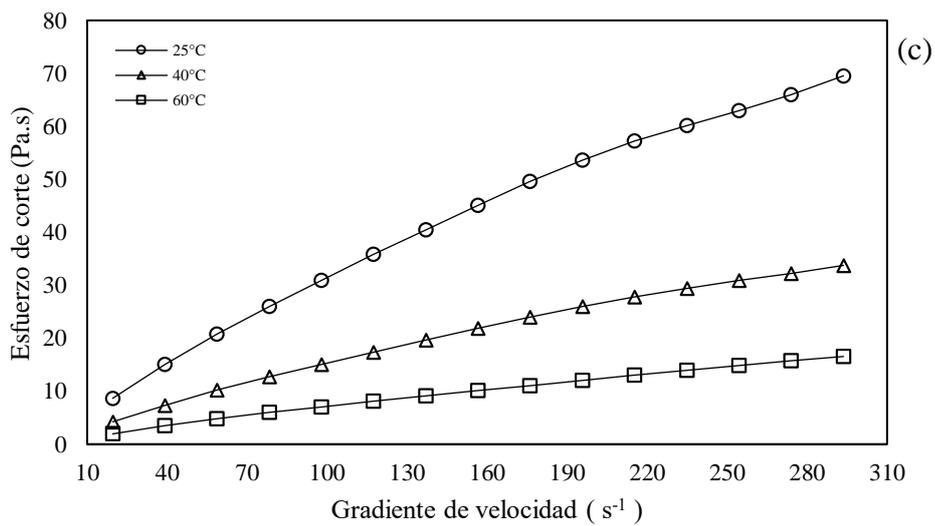
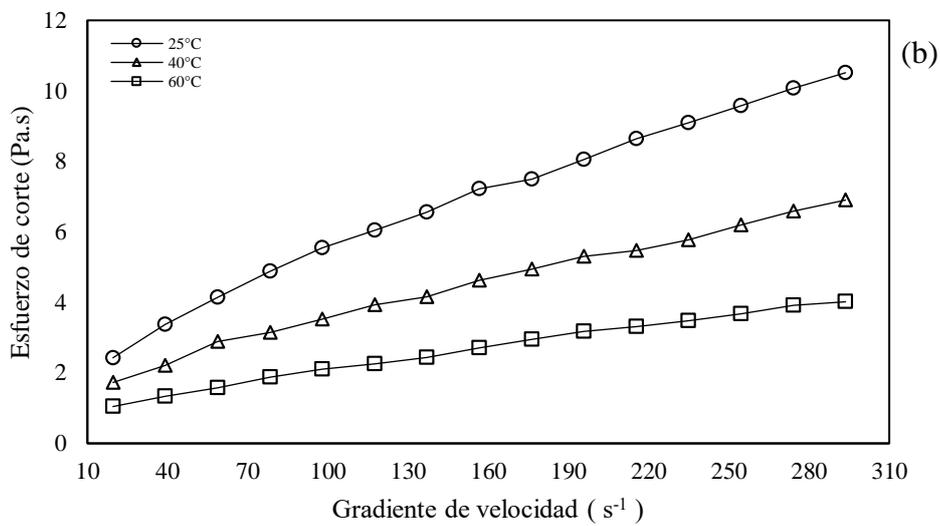
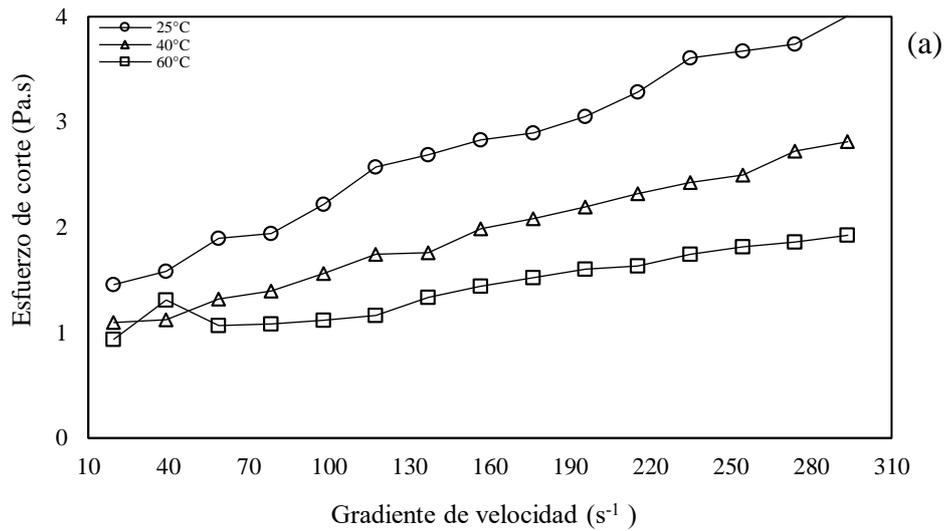


Figura 7. Reogramas de la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas

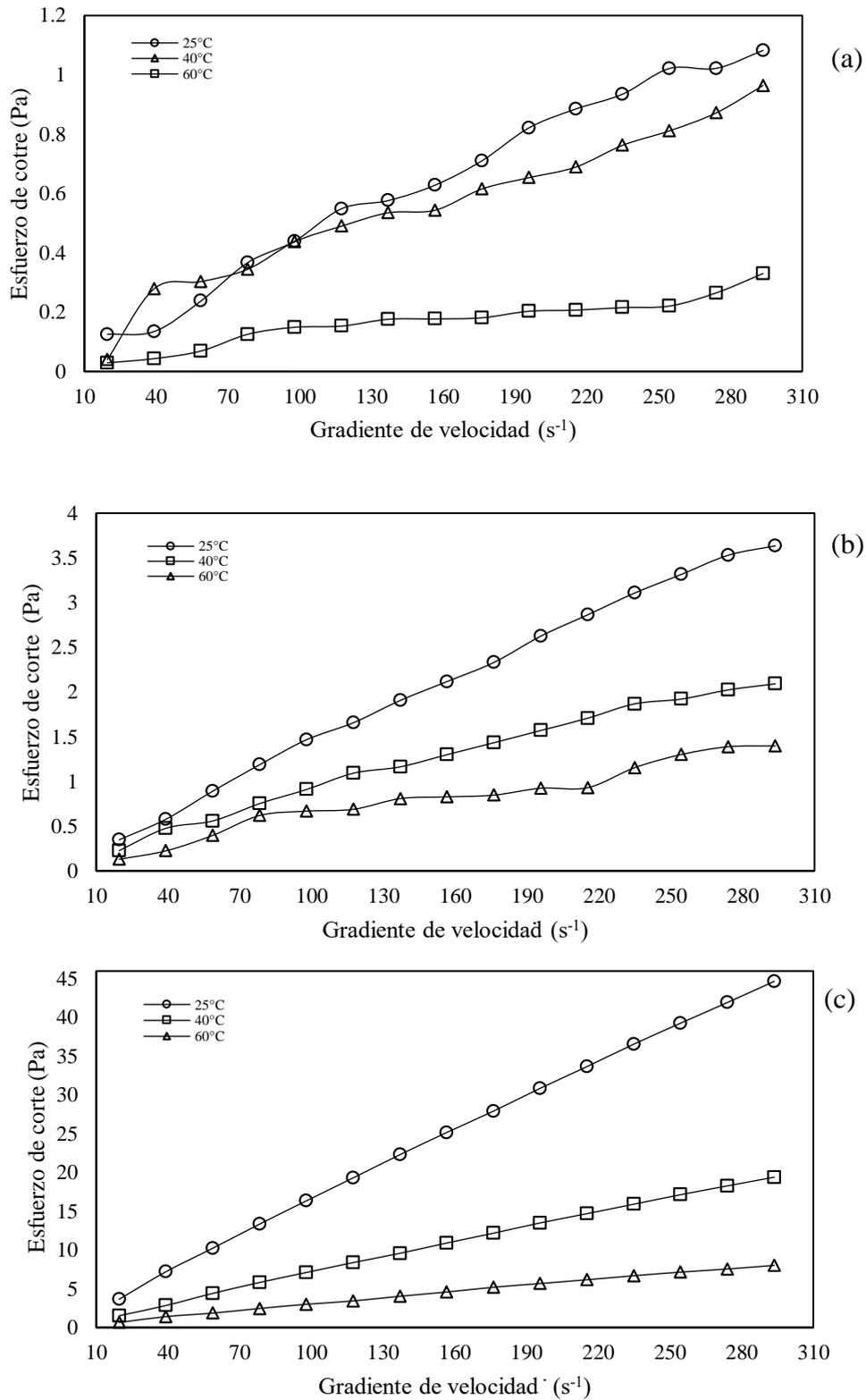


Figura 8. Reogramas de la pulpa de Aguaymanto a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.

Los parámetros reológicos del modelo de Ley de Potencia, Herschel-Bulkley y Casson para la pulpa de sanky y aguaymanto a diferentes temperaturas y concentraciones se muestran en la Tabla 13. La pulpa de sanky y aguaymanto exhibieron el comportamiento reológico de un fluido no newtoniano pseudoplastico, ya que el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) presento valores menores a 1 ( $n < 1$ ) para todas las temperaturas y concentraciones. En el presente estudio, teniendo en cuenta el modelo de Ley de la Potencia como el que mejor describió a ambas pulpas, los valores de  $n$  para el sanky variaron de  $0.508 \pm 1.50E-02$  (65 °Brix – 25 °C) a  $0.785 \pm 7.00E-03$  (25 °Brix – 60 °C) y del aguaymanto de  $0.913 \pm 2.00E-02$  (65 °Brix – 25 °C) a  $0.947 \pm 4.50E-02$  (25 °Brix – 60 °C). Además, el índice de consistencia ( $K$ ) presentó un rango comprendido desde  $0.114 \pm 2.10E-02$  (25°Brix – 60 °C) a  $0.899 \pm 1.20E-02$  (Pa.s<sup>n</sup>) (65°Brix – 25 °C) y  $0.003 \pm 1.00E-04$  (25 °Brix -60 °C) a  $0.243 \pm 3.00E-03$  (Pa.s<sup>n</sup>) (65 °Brix - 25 °C) para las pulpas de sanky y aguaymanto respectivamente. Respecto al aguaymanto Bustamante et al. (2016) reportaron un índice de flujo ( $n$ ) de 0.807 a 28 °Brix y 65 °C; sin embargo, en el presente estudio los factores más cercanos a los reportados (65 °Brix y 25°C) presentaron un índice de flujo ( $n$ ) de  $0.816 \pm 9.00E-03$ . Además, al igual que en esta investigación (65 °Brix y 25 °C,  $K = 0.243 \pm 3.00E-03$ ) el máximo valor del índice de consistencia fue reportado a la temperatura más baja y máxima concentración. La pulpa de aguaymanto manifestó un mayor comportamiento pseudoplastico que el sanky debido a que los valores del índice de comportamiento de flujo fueron más cercanos a la unidad. Ambas pulpas presentaron una tendencia definida con la temperatura y concentración. Sin embargo, Ahmed (2004) menciona que este factor no influye significativamente sobre el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ). Con relación a los valores del índice de consistencia se observó una orientación definida con la temperatura y concentración para ambos frutos.

El comportamiento pseudoplástico está basado en que el material forma grandes agregados moleculares, debido a su estructura molecular, peso molecular, dispersión, interacciones del tipo de Vander-Walls y propiedades funcionales (Trachtenberg & Mayer, 1982; Cárdenas et al., 1997; Majdoub et al., 2001; MedinaTorres et al., 2000; León-Martínez et al., 2011). De acuerdo con Harnanan et al. (2001) usualmente, el modelo de ley de potencia se usa para indicar pseudoplasticidad debido a sólidos disueltos, a través del índice de comportamiento del fluido. Diversas investigaciones coinciden en que el modelo de ley de potencia describe adecuadamente el comportamiento reológico de las pulpas y purés de frutas (Saravacos, 1968; Rao et al., 1986; Sánchez et al., 2009; Bustamante et al. 2016)

Según Ditchfield et al. (2004), probablemente existen interacciones promovidas por las altas temperaturas que afectan la dependencia de la temperatura del índice de consistencia. Sin embargo, Nindo et al. (2005) mencionan que en ocasiones la variación del índice de consistencia no puede ser explicado únicamente por la influencia de la temperatura y el contenido de sólidos, debido a que es posible que se produzca alguna transformación estructural en las pulpas con un alto contenido sólidos durante las pruebas de flujo, por tanto, las partículas pueden separarse y aglomerarse en las paredes geométricas. Este comportamiento no se observa a bajas concentraciones dado que la interacción entre partículas es muy débil, por lo que las estructuras no se ven afectadas.

Tabla 13. Parámetros reológicos del modelo de Ley de Potencia, Herschel y Bulkley y Casson para la pulpa de sanky y aguaymanto a diferentes temperaturas y concentraciones

Temperatura (°C)	Parámetro	Ley de la Potencia			Herschel y Bulkley			Casson		
		25	45	65	25	45	65	25	45	65
<b>Sanky</b>										
25	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.223 ± 2.20E-02	0.331 ± 7.50E-02	0.899 ± 1.20E-02	0.098 ± 4.50E-02	0.184 ± 1.70E-02	0.617 ± 4.00E-03	0.069 ± 2.00E-03	0.130 ± 2.00E-03	0.420 ± 3.00E-03
	n	0.755 ± 2.20E-02	0.580 ± 2.10E-02	0.508 ± 1.50E-02	0.837 ± 1.00E-02	0.685 ± 2.20E-02	0.624 ± 9.50E-02	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.395 ± 4.95E-02	0.545 ± 7.07E-03	0.515 ± 2.05E-01	0.682 ± 3.43E-02	0.471 ± 2.88E-02	0.784 ± 7.57E-02
	R <sup>2</sup>	0.984	0.997	0.999	0.972	0.995	0.996	0.974	0.998	0.993
40	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.136 ± 8.00E-03	0.215 ± 2.80E-02	0.424 ± 2.10E-02	0.035 ± 1.30E-02	0.113 ± 1.50E-02	0.302 ± 2.00E-03	0.053 ± 1.00E-03	0.100 ± 2.00E-03	0.294 ± 1.00E-03
	n	0.740 ± 4.20E-02	0.606 ± 2.20E-02	0.533 ± 1.70E-02	0.830 ± 0.00E+00	0.695 ± 2.10E-02	0.690 ± 1.40E-02	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.16 ± 2.83E-02	0.33 ± 8.49E-02	0.705 ± 7.07E-03	0.577 ± 2.55E-02	0.773 ± 9.45E-03	0.851 ± 5.22E-04
	R <sup>2</sup>	0.99	0.998	0.999	0.99	0.997	0.997	0.955	0.996	0.994
60	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.114 ± 2.10E-02	0.141 ± 7.00E-03	0.190 ± 7.00E-03	0.029 ± 1.70E-02	0.058 ± 1.20E-02	0.157 ± 8.00E-03	0.037 ± 1.00E-03	0.079 ± 1.00E-03	0.203 ± 5.00E-03
	n	0.785 ± 7.00E-03	0.609 ± 4.30E-02	0.550 ± 3.60E-02	0.810 ± 0.00E+00	0.720 ± 4.20E-02	0.690 ± 1.13E-01	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.155 ± 7.78E-02	0.114 ± 7.92E-02	0.145 ± 6.36E-02	0.554 ± 1.32E-02	0.128 ± 1.76E-02	0.586 ± 1.32E-01
	R <sup>2</sup>	0.969	0.994	0.999	0.977	0.995	0.999	0.916	0.992	0.998
<b>Aguaymanto</b>										
25	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.007 ± 1.00E-03	0.024 ± 1.00E-03	0.243 ± 3.00E-03	0.005 ± 1.00E-03	0.023 ± 5.00E-03	0.231 ± 2.00E-03	0.056 ± 3.82E-03	0.105 ± 2.62E-03	0.371 ± 1.91E-03
	n	0.917 ± 4.00E-03	0.913 ± 2.00E-02	0.816 ± 9.00E-03	0.975 ± 3.20E-02	0.899 ± 3.50E-02	0.926 ± 3.00E-03	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.085 ± 2.12E-02	0.018 ± 3.54E-03	0.075 ± 2.12E-02	0.008 ± 4.96E-03	0.026 ± 1.77E-02	0.116 ± 4.67E-03
	R <sup>2</sup>	0.975	0.996	0.999	0.965	0.993	0.999	0.975	0.992	0.961
40	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.005 ± 1.00E-03	0.021 ± 1.00E-03	0.092 ± 1.00E-03	0.006 ± 6.00E-03	0.016 ± 0.00E+00	0.089 ± 1.00E-03	0.052 ± 3.75E-03	0.078 ± 4.10E-03	0.25 ± 9.90E-04
	n	0.945 ± 2.00E-03	0.924 ± 5.00E-03	0.824 ± 2.00E-02	0.951 ± 2.00E-03	0.860 ± 3.00E-03	0.677 ± 1.90E-02	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.009 ± 3.54E-04	0.025 ± 7.07E-03	0.090 ± 5.59E-04	0.013 ± 1.30E-02	0.026 ± 1.49E-02	0.029 ± 1.01E-03
	R <sup>2</sup>	0.975	0.984	0.999	0.982	0.983	0.999	0.905	0.992	0.999
60	K (Pa.s <sup>n</sup> )	0.003 ± 1.00E-04	0.011 ± 1.00E-03	0.039 ± 8.00E-03	0.003 ± 2.00E-03	0.008 ± 1.00E-03	0.037 ± 7.00E-03	0.027 ± 9.69E-03	0.056 ± 2.83E-03	0.161 ± 5.16E-03
	n	0.947 ± 4.50E-02	0.890 ± 1.00E-03	0.840 ± 5.00E-03	0.954 ± 3.90E-02	0.899 ± 4.00E-03	0.806 ± 1.30E-01	-	-	-
	τ <sub>0</sub>	-	-	-	0.012 ± 7.07E-04	0.023 ± 8.49E-03	0.084 ± 2.12E-03	0.015 ± 1.78E-02	0.039 ± 3.08E-02	0.016 ± 1.30E-02

---

R2

0.936

0.968

0.997

0.867

0.96

0.997

0.861

0.961

0.997

#### 4.2.2. Análisis estadístico

Se emplearon tres modelos matemáticos para describir el comportamiento reológico de la pulpa de sanky y aguaymanto. Se encontró que el modelo matemático que logró describir mejor al comportamiento reológico de la pulpa de sanky, a diferentes concentraciones, fue al modelo de Ostwald de Waele o Ley de la potencia ( $SSE \leq 0.0031 \pm 0.0015$ ;  $RMSE \leq 0.444 \pm 0.0019$ ;  $EME \leq 0.4599 \pm 0.002$ ;  $X^2 \leq 0.0034 \pm 0.0017$ ;  $R^2 \geq 0.97$ ), que el modelo de Casson ( $SSE \leq 0.007 \pm 0.006$ ;  $RMSE \leq 0.4481 \pm 0.043$ ;  $EME \leq 0.445 \pm 0.037$ ;  $X^2 \leq 0.0003 \pm 0.0001$ ;  $R^2 \geq 0.968$ ) y el modelo de Herschel-Bulkey ( $SSE \leq 0.0127 \pm 0.009$ ;  $RMSE \leq 0.9021 \pm 0.0399$ ;  $EME \leq 0.9023 \pm 0.034$ ;  $X^2 \leq 0.018 \pm 0.0023$ ;  $R^2 \geq 0.945$ ), como se muestra en la Tabla 14. En la pulpa de aguaymanto, el modelo de Ostwald de Waele se ajustó mejor a los datos experimentales del comportamiento de reológico ( $SSE \leq 0.00929 \pm 0.005$ ;  $RMSE \leq 0.085 \pm 0.013$ ;  $EME \leq 0.081 \pm 0.004$ ;  $X^2 \leq 0.010 \pm 0.006$ ;  $R^2 \geq 0.807$ ) en comparación con el modelo de Casson ( $SSE \leq 0.039 \pm 0.036$ ;  $RMSE \leq 0.309 \pm 0.0769$ ;  $EME \leq 0.2861 \pm 0.0298$ ;  $X^2 \leq 0.017 \pm 0.01$ ;  $R^2 \geq 0.711$ ) y el modelo de Herschel-Bulkey ( $SSE \leq 0.061 \pm 0.086$ ;  $RMSE \leq 0.186 \pm 0.229$ ;  $EME \leq 0.193 \pm 0.237$ ;  $X^2 \leq 0.065 \pm 0.092$ ;  $R^2 \geq 0.767$ ), según se aprecia en el Tabla 15.

Este modelo, ley de la potencia, es uno de los más usados para describir el comportamiento reológico de diversas pulpas de frutas, según lo menciona Quintana et. al (2016). Fue usado para describir el comportamiento de pulpas como la de mango (Vidal et. al, 2004), guayaba, guanábana, níspero (Andrade et. al, 2009), aguaymanto con baja concentración (Bustamante et. al, 2016) y pulpa azucarada de tamarindo (Tirado et. al, 2014).

Tabla 14. Errores de los modelos matemáticos aplicados en la pulpa de sanky

Concentración [Brix]	Temperatura (C°)	SSE	RMSE	EME	CHI CUAD.	R <sup>2</sup>
Modelo matemático: LEY DE LA POTENCIA						
	25	0.0009 ± 6.67E-04	0.159 ± 6.05E-02	0.1729 ± 7.28E-02	0.0003 ± 2.52E-04	0.974
25	40	0.0031 ± 1.55E-03	0.0548 ± 1.41E-02	0.0573 ± 1.48E-02	0.0034 ± 1.69E-03	0.984
	60	0.0003 ± 7.37E-05	0.0521 ± 7.07E-03	0.0544 ± 7.39E-03	0.0003 ± 8.04E-05	0.970
	25	0.0002 ± 1.07E-04	0.2496 ± 1.23E-01	0.2607 ± 1.29E-01	0.0002 ± 1.16E-04	0.996
45	40	0.0002 ± 1.47E-04	0.2151 ± 4.79E-02	0.2247 ± 5.01E-02	0.0001 ± 4.72E-05	0.996
	60	0.0002 ± 1.09E-04	1.3882 ± 2.02E-01	1.4499 ± 2.11E-01	0.0001 ± 2.58E-05	0.994
	25	0.0002 ± 7.75E-05	1.1179 ± 9.46E-02	1.2071 ± 2.72E-02	0.0002 ± 2.33E-05	0.999
65	40	0.0002 ± 5.61E-05	0.4443 ± 1.90E-03	0.4599 ± 1.96E-03	0.0002 ± 7.46E-06	0.999
	60	0.0001 ± 6.21E-05	0.0636 ± 2.09E-02	0.0659 ± 2.16E-02	0.0001 ± 2.85E-05	0.999
Modelo matemático: CASSON						
	25	0.0031 ± 1.62E-03	0.0551 ± 1.47E-02	0.0575 ± 1.54E-02	0.0034 ± 1.77E-03	0.966
25	40	0.0013 ± 9.05E-04	0.0343 ± 1.32E-02	0.0355 ± 1.36E-02	0.0044 ± 3.29E-03	0.979
	60	0.0008 ± 7.10E-04	0.0269 ± 1.32E-02	0.0279 ± 1.37E-02	0.0009 ± 7.63E-04	0.968
	25	0.0005 ± 2.88E-05	0.022 ± 6.53E-04	0.0228 ± 6.76E-04	0.0005 ± 3.08E-05	0.997
45	40	0.0004 ± 1.27E-04	0.0209 ± 3.03E-03	0.0216 ± 3.14E-03	0.0005 ± 1.36E-04	0.994
	60	0.0004 ± 4.03E-04	0.0195 ± 1.03E-02	0.0203 ± 1.06E-02	0.0005 ± 4.29E-04	0.992
	25	0.0164 ± 2.14E-03	0.128 ± 8.38E-03	0.1325 ± 8.67E-03	0.0176 ± 2.30E-03	0.997
65	40	0.0068 ± 4.47E-04	0.0822 ± 2.72E-03	0.085 ± 2.82E-03	0.0072 ± 4.79E-04	0.994
	60	0.0008 ± 6.39E-04	0.0265 ± 1.20E-02	0.0275 ± 1.24E-02	0.0008 ± 6.83E-04	0.995
Modelo matemático: HERSCHEL-BULKLEY						
	25	0.0018 ± 1.99E-03	0.3777 ± 2.63E-01	0.3955 ± 2.68E-01	0.0019 ± 2.12E-03	0.979
25	40	0.0069 ± 5.83E-03	0.0788 ± 3.70E-02	0.0816 ± 3.83E-02	0.0074 ± 6.25E-03	0.970
	60	0.0004 ± 6.67E-05	0.1987 ± 1.68E-02	0.2072 ± 1.80E-02	0.0004 ± 7.46E-05	0.945
	25	0.0004 ± 1.39E-04	0.4157 ± 3.62E-01	0.6578 ± 5.32E-02	0.0004 ± 1.49E-04	0.998
45	40	0.0001 ± 3.22E-05	0.5724 ± 5.07E-01	0.2433 ± 4.35E-02	0.0001 ± 3.41E-05	0.997
	60	0.0004 ± 4.66E-04	1.8485 ± 4.56E-02	1.8626 ± 7.26E-02	0.0001 ± 3.05E-05	0.995
	25	0.0003 ± 8.01E-05	1.4481 ± 4.33E-01	1.4447 ± 3.73E-02	0.0003 ± 8.58E-05	0.993
65	40	0.0002 ± 4.31E-05	0.6302 ± 7.72E-02	0.5737 ± 8.09E-02	0.0002 ± 4.62E-05	0.995
	60	0.0001 ± 9.27E-05	0.1074 ± 6.31E-03	0.2627 ± 5.24E-02	0.0001 ± 9.99E-05	0.999

Tabla 15. Errores de los modelos matemáticos aplicados en la pulpa de aguaymanto

Concentración [Brix]	Temperatura (C°)	SSE	RMSE	EME	CHI CUAD.	R2
Modelo matemático: LEY DE LA POTENCIA						
25	25	0.001 ± 3.82E-04	0.034 ± 5.59E-03	0.015 ± 5.80E-03	0.001 ± 4.12E-04	0.974
	40	0.008 ± 7.73E-03	0.014 ± 3.28E-03	0.028 ± 3.41E-03	0.007 ± 1.01E-02	0.981
	60	0.009 ± 5.10E-03	0.085 ± 1.29E-02	0.081 ± 3.87E-03	0.01 ± 5.55E-03	0.807
45	25	0.002 ± 3.06E-03	0.041 ± 3.74E-02	0.032 ± 2.46E-02	0.003 ± 3.28E-03	0.996
	40	0.001 ± 1.32E-03	0.033 ± 2.02E-02	0.034 ± 2.09E-02	0.001 ± 1.41E-03	0.989
	60	0.002 ± 1.69E-04	0.043 ± 1.99E-03	0.044 ± 2.14E-03	0.002 ± 1.89E-04	0.982
65	25	0.001 ± 6.41E-06	0.003 ± 1.19E-03	0.003 ± 1.23E-03	0.001 ± 6.86E-06	0.999
	40	0.001 ± 5.17E-06	0.007 ± 3.94E-04	0.007 ± 4.08E-04	0.001 ± 5.54E-06	0.999
	60	0.001 ± 2.05E-04	0.017 ± 6.03E-03	0.018 ± 6.24E-03	0.001 ± 2.20E-04	0.997
Modelo matemático: CASSON						
25	25	0.005 ± 5.30E-03	0.032 ± 3.99E-03	0.038 ± 2.29E-03	0.005 ± 5.71E-03	0.975
	40	0.035 ± 1.07E-02	0.059 ± 9.05E-03	0.061 ± 9.27E-03	0.017 ± 1.78E-02	0.905
	60	0.039 ± 3.65E-02	0.309 ± 7.69E-02	0.286 ± 2.98E-02	0.016 ± 1.98E-03	0.711
45	25	0.003 ± 3.95E-03	0.077 ± 5.02E-02	0.028 ± 8.00E-03	0.006 ± 1.60E-03	0.995
	40	0.007 ± 3.11E-03	0.043 ± 2.70E-02	0.043 ± 2.72E-02	0.002 ± 2.45E-03	0.992
	60	0.014 ± 6.85E-04	0.05 ± 9.26E-03	0.084 ± 9.61E-03	0.038 ± 2.00E-03	0.961
65	25	0.001 ± 1.45E-04	0.027 ± 2.88E-03	0.026 ± 3.03E-03	0.006 ± 1.58E-04	0.999
	40	0.001 ± 8.68E-05	0.026 ± 1.70E-03	0.026 ± 1.76E-03	0.007 ± 9.30E-05	0.999
	60	0.001 ± 5.33E-04	0.029 ± 9.15E-03	0.03 ± 9.47E-03	0.001 ± 5.72E-04	0.998
Modelo matemático: HERSCHEL-BULKEY						
25	25	0.003 ± 2.44E-03	0.055 ± 2.23E-02	0.057 ± 2.30E-02	0.003 ± 2.60E-03	0.965
	40	0.061 ± 8.55E-02	0.186 ± 2.29E-01	0.193 ± 2.37E-01	0.065 ± 9.16E-02	0.981
	60	0.015 ± 6.35E-03	0.123 ± 2.59E-02	0.128 ± 2.72E-02	0.017 ± 6.93E-03	0.767
45	25	0.005 ± 3.42E-04	0.021 ± 8.23E-03	0.022 ± 8.69E-03	0.001 ± 3.77E-04	0.993
	40	0.014 ± 1.23E-03	0.035 ± 1.73E-02	0.037 ± 1.79E-02	0.002 ± 1.32E-03	0.983
	60	0.029 ± 1.00E-03	0.054 ± 9.34E-03	0.055 ± 9.58E-03	0.031 ± 1.06E-03	0.966
65	25	0.001 ± 9.89E-06	0.003 ± 1.44E-03	0.004 ± 1.49E-03	0.001 ± 1.06E-05	0.999
	40	0.001 ± 9.58E-06	0.007 ± 2.24E-03	0.007 ± 6.94E-04	0.005 ± 1.03E-05	0.999
	60	0.003 ± 1.96E-04	0.018 ± 5.54E-03	0.018 ± 5.73E-03	0.004 ± 1.32E-03	0.983

El análisis estadístico de los resultados obtenidos de los parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto se muestra en la Tabla 16. La  $\eta_{app}$  fue observada a una velocidad de cizalla de  $97.9 \text{ s}^{-1}$ . Los resultados obtenidos para el sanky evidenciaron una influencia significativa ( $p\text{-valor} < 0.05$ ) de la concentración de sólidos ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) y temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) sobre la viscosidad aparente ( $\eta_{app}$ ), índice de flujo ( $n$ ) e índice de consistencia ( $k$ ). En la Figura 9, se observa la gráfica de superficie de respuesta para la viscosidad aparente (a), índice de flujo (b) e índice de consistencia (c). El punto máximo para la  $\eta_{app}$  e índice de consistencia fue a una baja temperatura y alta concentración. Sin embargo, el índice de flujo presentó valores altos a una baja concentración y elevada temperatura. Para la viscosidad aparente e índice de consistencia el efecto principal fue cuadrático. Por ende, se determinó un alto grado de influencia de las interacciones entre las variables independientes ( $^{\circ}\text{Brix}$  y  $^{\circ}\text{C}$ ). Respecto al aguaymanto, la  $\eta_{app}$  fue observada a la misma velocidad de cizalla que la pulpa de sanky. En los resultados obtenidos, se observó que las variables independientes ( $^{\circ}\text{Brix}$  y  $^{\circ}\text{C}$ ) tienen una influencia significativa en las variables respuesta ( $\eta_{app}$ ,  $n$  y  $k$ ) ya que el  $p\text{-valor}$  es  $< 0.05$  en todos los casos. La influencia sobre cada variable dependiente fue representada en gráficas de superficie respuesta (Figura 10). El punto óptimo para  $\eta_{app}$  (10a) se presentó cuando la concentración de la pulpa es mayor y la temperatura de la misma tiene valores bajos. Lo mismo sucede para el índice de consistencia ( $k$ ) (10c). Sin embargo, para el índice de flujo ( $n$ ) (10b) se observó que el punto óptimo se presentaba a concentraciones bajas y temperaturas altas, igual al sanky. Autores mencionan que el índice de consistencia e índice de flujo por lo general presentan una relación estrecha con la concentración, ambas aumentan o disminuyen, y una relación inversa con la temperatura, es por ello que el punto óptimo de estos parámetros se podrá obtener a una alta concentración y baja temperatura. Se demostró que el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente

es más pronunciado cuando la concentración de la pulpa de sanky y aguaymanto es mayor, lo cual coincide con el estudio realizado por Juszczak & Fortuna (2003) en pulpa de cereza. Esto también refleja la característica pseudoplástica típica donde la viscosidad disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Tabla 16. Parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto según el modelo de ley de la potencia.

Tratamiento	°Brix	°C	$\eta_{app}$ (mPa.s)	n	$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )
<b>Sanky</b>					
1	25	25	$23.80 \pm 1.62E+00$ <sup>a</sup>	$0.75 \pm 2.20E-02$ <sup>a</sup>	$0.22 \pm 2.24E-02$ <sup>a</sup>
2	25	40	$16.15 \pm 3.00E-01$ <sup>b</sup>	$0.74 \pm 4.20E-02$ <sup>a</sup>	$0.33 \pm 7.45E-02$ <sup>b</sup>
3	25	60	$12.25 \pm 3.78E-01$ <sup>c</sup>	$0.79 \pm 7.00E-03$ <sup>a</sup>	$0.90 \pm 1.10E-02$ <sup>bc</sup>
4	45	25	$54.89 \pm 2.40E+00$ <sup>d</sup>	$0.58 \pm 2.10E-02$ <sup>b</sup>	$0.14 \pm 7.99E-03$ <sup>cd</sup>
5	45	40	$35.32 \pm 1.05E+00$ <sup>e</sup>	$0.61 \pm 2.20E-02$ <sup>bc</sup>	$0.22 \pm 2.81E-02$ <sup>cd</sup>
6	45	60	$21.10 \pm 6.25E-01$ <sup>f</sup>	$0.61 \pm 4.30E-02$ <sup>bc</sup>	$0.44 \pm 0.00E+00$ <sup>d</sup>
7	65	25	$318.18 \pm 2.61E+00$ <sup>fg</sup>	$0.51 \pm 1.50E-02$ <sup>bc</sup>	$0.16 \pm 4.64E-02$ <sup>d</sup>
8	65	40	$154.80 \pm 6.02E-01$ <sup>gh</sup>	$0.53 \pm 1.70E-02$ <sup>cd</sup>	$0.14 \pm 0.00E+00$ <sup>d</sup>
9	65	60	$71.82 \pm 6.72E-01$ <sup>h</sup>	$0.55 \pm 3.60E-02$ <sup>d</sup>	$0.19 \pm 7.28E-03$ <sup>d</sup>
		p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05
		R <sup>2</sup>	0.99	0.98	0.98
<b>Aguaymanto</b>					
1	25	25	$4.58 \pm 1.32E-01$ <sup>f</sup>	$0.92 \pm 4.00E-03$ <sup>ab</sup>	$0.01 \pm 8.73E-04$ <sup>f</sup>
2	25	40	$4.80 \pm 4.76E-01$ <sup>f</sup>	$0.95 \pm 2.00E-03$ <sup>a</sup>	$0.01 \pm 2.02E-04$ <sup>f</sup>
3	25	60	$1.34 \pm 7.07E-04$ <sup>g</sup>	$0.95 \pm 4.50E-02$ <sup>c</sup>	$0.00 \pm 4.61E-05$ <sup>f</sup>
4	45	25	$15.72 \pm 1.04E+00$ <sup>d</sup>	$0.91 \pm 2.00E-02$ <sup>abc</sup>	$0.02 \pm 4.16E-04$ <sup>d</sup>
5	45	40	$9.24 \pm 8.70E-02$ <sup>e</sup>	$0.92 \pm 5.00E-03$ <sup>c</sup>	$0.02 \pm 9.20E-04$ <sup>de</sup>
6	45	60	$6.42 \pm 5.80E-01$ <sup>f</sup>	$0.89 \pm 1.00E-03$ <sup>bc</sup>	$0.01 \pm 7.14E-04$ <sup>ef</sup>
7	65	25	$165.86 \pm 1.53E+00$ <sup>a</sup>	$0.82 \pm 9.00E-03$ <sup>d</sup>	$0.24 \pm 2.80E-03$ <sup>a</sup>
8	65	40	$72.78 \pm 3.51E-01$ <sup>b</sup>	$0.82 \pm 2.00E-02$ <sup>d</sup>	$0.09 \pm 1.49E-04$ <sup>b</sup>
9	65	60	$30.98 \pm 5.78E-01$ <sup>c</sup>	$0.84 \pm 5.00E-03$ <sup>d</sup>	$0.04 \pm 8.45E-03$ <sup>c</sup>
		p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05
		R <sup>2</sup>	0.99	0.99	0.99

\*Medias seguidas de letras distintas indican diferencia estadística de acuerdo a la prueba de comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ )

Del diseño estadístico aplicado a las propiedades reológicas de la pulpa de sanky y aguaymanto se obtuvieron ecuaciones cuadráticas que describieron el efecto de las variables independientes sobre los parámetros reológicos. Las Ec. 64- 66 describen el efecto sobre la  $\eta_{app}$ , n y k de la pulpa de sanky, respectivamente. De igual forma las Ec. 67- 69 describen la

influencia sobre la pulpa de aguaymanto,  $\eta_{app}$ , n y k respectivamente. Donde la variable “x” es la concentración y la variable “y” es la temperatura. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa ya que los valores del nivel de significación fueron menores a 0.05, es decir, la interacción de las variables independientes generó una variación sobre las variables dependientes (Estadísticamente diferentes). Sin embargo, se acepta la hipótesis nula para el índice de flujo del sanky debido a que el valor del nivel de significación de la interacción de las variables independientes fue 0.069, para lo cual se utilizaron las variables independientes decodificadas.

$$\eta_{app} = 843.264 - 51.275x + 0.775x^2 - 27.143y + 0.235y^2 + 1.657xy - 0.014xy^2 - 0.025x^2y + 0.0002x^2y^2 \dots \text{(Ec. 64)}$$

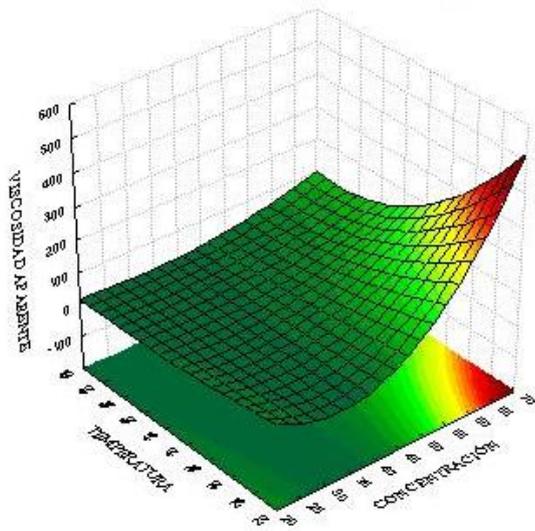
$$n = 1.032 - 0.017x + 0.0001x^2 + 0.003y - 0.000019y^2 \dots \text{(Ec. 65)}$$

$$k = 2.144 - 0.080x + 0.0008x^2 - 0.109y + 0.002y^2 + 0.004xy - 0.00006xy^2 - 0.00004x^2y + 0.000005x^2y^2 \dots \text{(Ec. 66)}$$

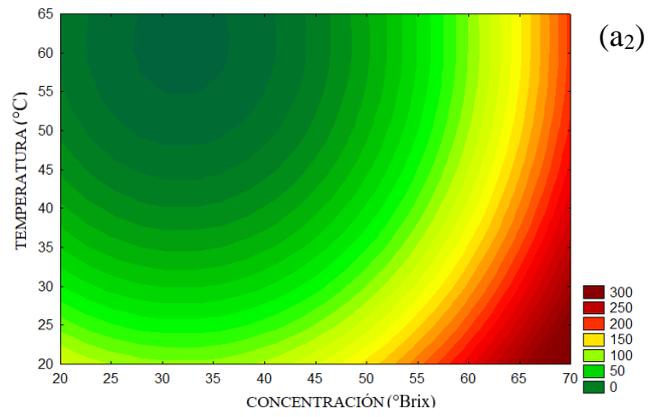
$$\eta_{app} = 219.734 - 6.002x + 0.091x^2 - 4.818y + 0.040y^2 \dots \text{(Ec. 67)}$$

$$n = 0.812 + 0.0036x - 0.00007x^2 + 0.0029y - 0.00002y^2 \dots \text{(Ec. 68)}$$

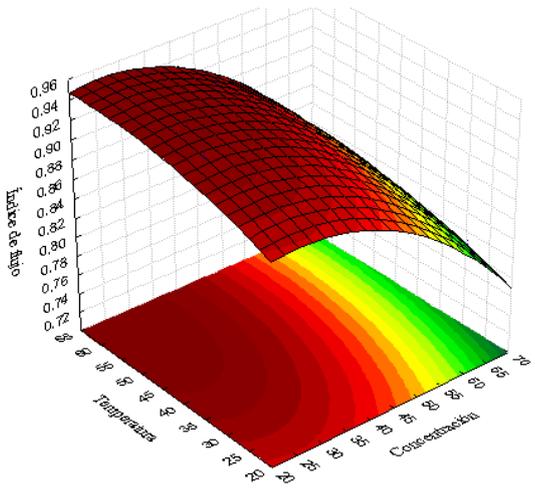
$$k = 0.307 - 0.007x + 0.0001x^2 + 0.008y - 0.00006y^2 \dots \text{(Ec. 69)}$$



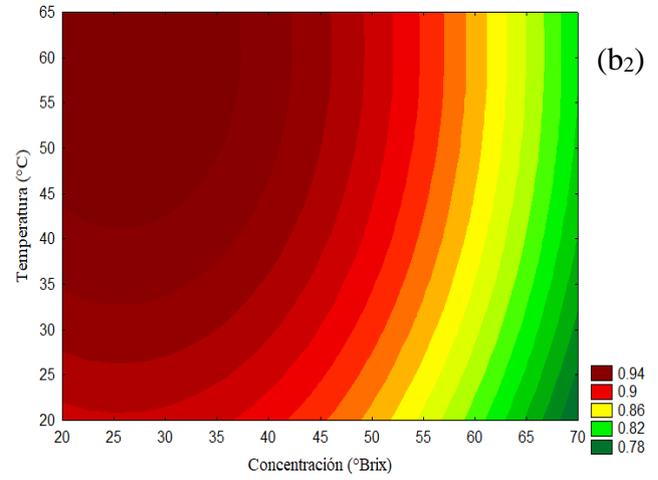
(a<sub>1</sub>)



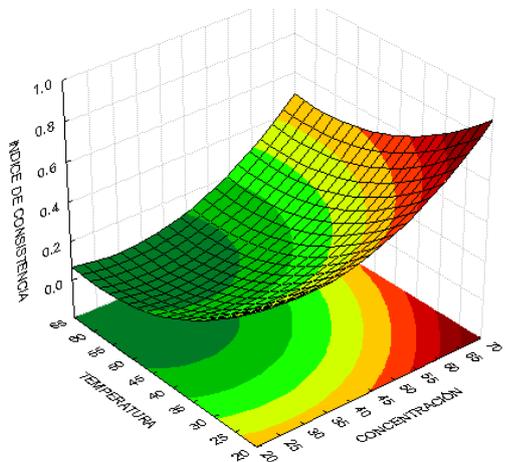
(a<sub>2</sub>)



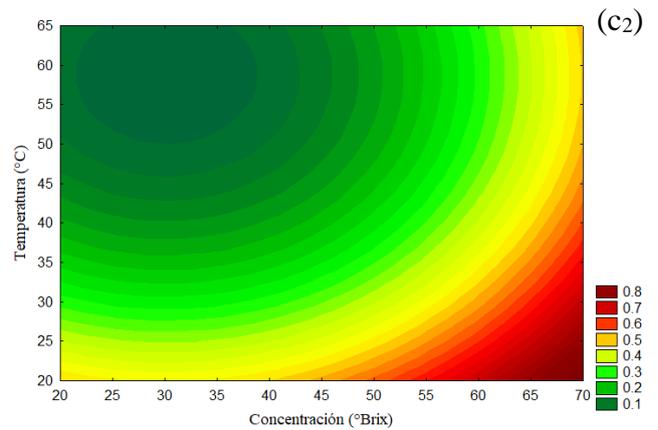
(b<sub>1</sub>)



(b<sub>2</sub>)



(c<sub>1</sub>)



(c<sub>2</sub>)

Figura 9. Grafica de superficie de respuesta y de contorno para la viscosidad aparente (a<sub>1</sub> y a<sub>2</sub>), índice de flujo (b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub>) e índice de consistencia (c<sub>1</sub> y c<sub>2</sub>) de la pulpa de sanky.

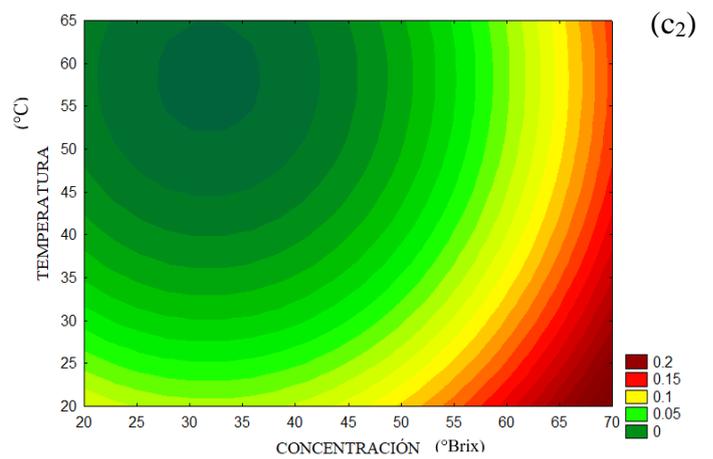
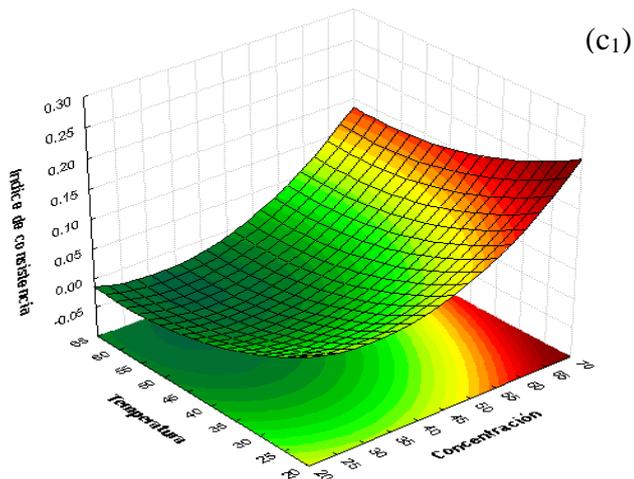
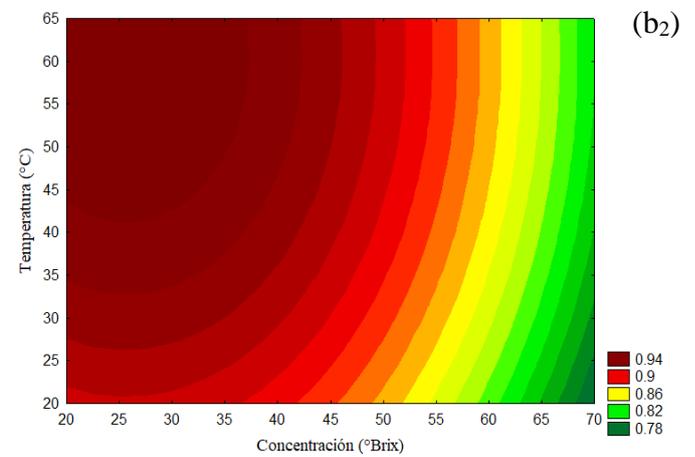
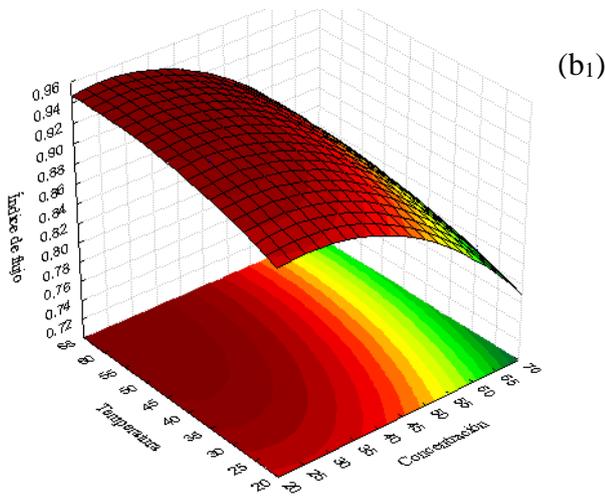
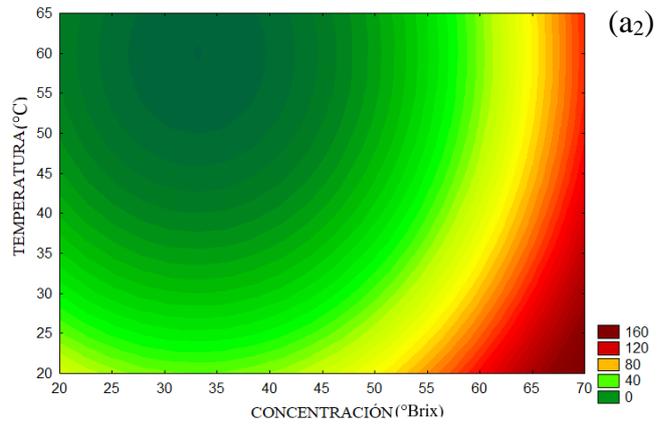
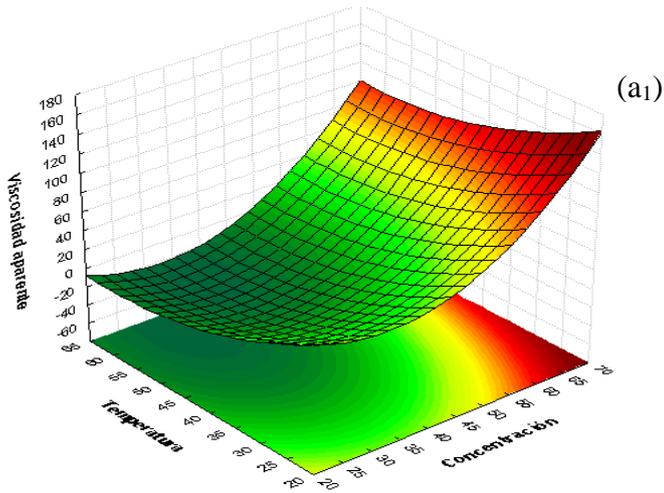


Figura 10. Grafica de superficie de respuesta y de contorno para la viscosidad aparente (a<sub>1</sub> y a<sub>2</sub>), índice de flujo (b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub>) e índice de consistencia (c<sub>1</sub> y c<sub>2</sub>) de la pulpa de aguaymanto.

### **4.2.3. Efecto de la temperatura y la concentración sobre el índice de comportamiento de flujo e índice de consistencia.**

#### ***4.2.3.1. Efecto de la temperatura***

En la Figura 11 se muestra el comportamiento del índice de consistencia frente al inverso de la temperatura absoluta para las tres concentraciones de pulpa de sanky y aguaymanto. Para ambas pulpas se observó que el índice de consistencia se incrementó a una mayor temperatura y concentración. Sin embargo, el aguaymanto presentó valores más bajos en comparación al sanky. En la Tabla 17 se muestran los parámetros  $K_0$  y  $E_a$ , los cuales se obtuvieron a partir del ajuste de la Ec. 31. El parámetro  $K_0$  de la pulpa de sanky y aguaymanto varió desde  $2.40E-03$  a  $3.00E-07$  (Pa.s<sup>n</sup>) y  $1.30E-05$  a  $1.50E-08$  (Pa.s<sup>n</sup>) respectivamente. Asimismo, la energía de activación de flujo ( $E_a$ ) se mantuvo en un rango comprendido desde 15.757 a 36.607 (KJ/mol) para el sanky y desde 16.273 a 43.362 (KJ/mol) para el aguaymanto, lo cual está de acuerdo con los valores presentados para pulpas de fruta semilíquidos y líquidos (Krokida et al., 2007; Sánchez et al., 2009; Pedro et al., 2011). Además, ambas pulpas registraron los valores más altos de  $E_a$  a una mayor concentración. No obstante, a una concentración similar, Bustamante et al. (2016) obtuvieron un resultado menor para la pulpa de aguaymanto (4,09 KJ/mol); al valor encontrado e esta investigación (16.273 KJ/mol). Haminiuk et al. (2005) mencionan que para el movimiento de una molécula la energía de activación es necesaria, es decir, a medida que aumenta la temperatura la energía de activación se incrementa y el líquido fluye fácilmente. Por ende, en un sistema los valores más altos de energía de activación indicaron un cambio más rápido en la viscosidad. Cabe mencionar, que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) evidenció que los datos experimentales del sanky se ajustaron más que los del aguaymanto ya que presentó valores cercanos a la unidad comprendidos entre 0.977 y 0.999.

Tabla 17. Energía de activación de flujo de la pulpa de sanky y aguaymanto por medio de la ecuación de Arrhenius

Concentración [°Brix]	$K_0$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$E_a$ (KJ/molK)	$R^2$
<b>Sanky</b>			
<b>25</b>	2.40E-03	15.757	0.9777
<b>45</b>	1.95E-05	24.479	0.9997
<b>65</b>	3.00E-07	36.607	0.9996
<b>Aguaymanto</b>			
<b>25</b>	1.30E-05	16.273	0.8488
<b>45</b>	1.90E-05	18.226	0.9077
<b>65</b>	1.50E-08	43.362	0.9907

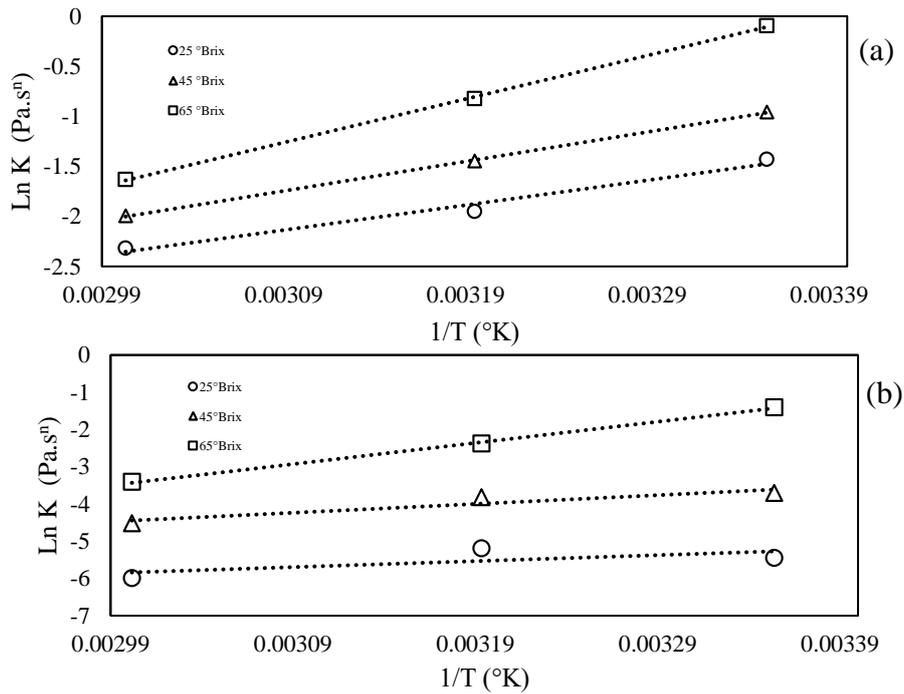


Figura 11. Logaritmo natural del índice de consistencia frente al inverso de la temperatura absoluta a diferentes concentraciones de pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b)

#### 4.2.3.2. Efecto de la concentración

Se evaluó el índice de consistencia frente al efecto de la concentración para las pulpas de sanky y aguaymanto (Figura 12). Se observó que el incremento del índice de consistencia esta sujeto a la concentración y temperatura. Por ende, este parámetro fue mayor a altas concentraciones y bajas temperaturas.

El parámetro **a** de la pulpa de sanky varió desde 2.00E-03 a 4.00E-02 y el de la pulpa de aguaymanto desde 1.00E-08 a 1.00E-06. Así mismo, el parámetro **b** presentó valores desde 1.39 a 0.52 y 3.96 a 2.40 para las pulpas de sanky y aguaymanto, respectivamente. Los valores de este último parámetro fueron influenciados por la temperatura, debido a que se elevaron conforme se incrementó este factor. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) evidenció el ajuste de los datos experimentales del sanky y aguaymanto puesto que los valores fueron cercanos a la unidad (0.944 a 0.977). Los parámetros mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 18, los cuales fueron obtenidos mediante el ajuste de la Ec.33.

Tabla 18. Parametros de la influencia de la concentración sobre el índice de consistencia

$K = aC^b$			
Temperatura [°C]	a	b	R <sup>2</sup>
<b>Sanky</b>			
<b>25</b>	2.00E-03	1.39E+00	0.9522
<b>40</b>	3.00E-03	1.18E+00	0.9778
<b>60</b>	4.00E-02	5.28E-01	0.9719

**Aguaymanto**

<b>25</b>	1.00E-08	3.96E+00	0.9442
<b>40</b>	4.50E-07	2.91E+00	0.9771
<b>60</b>	1.00E-06	2.41E+00	0.9317

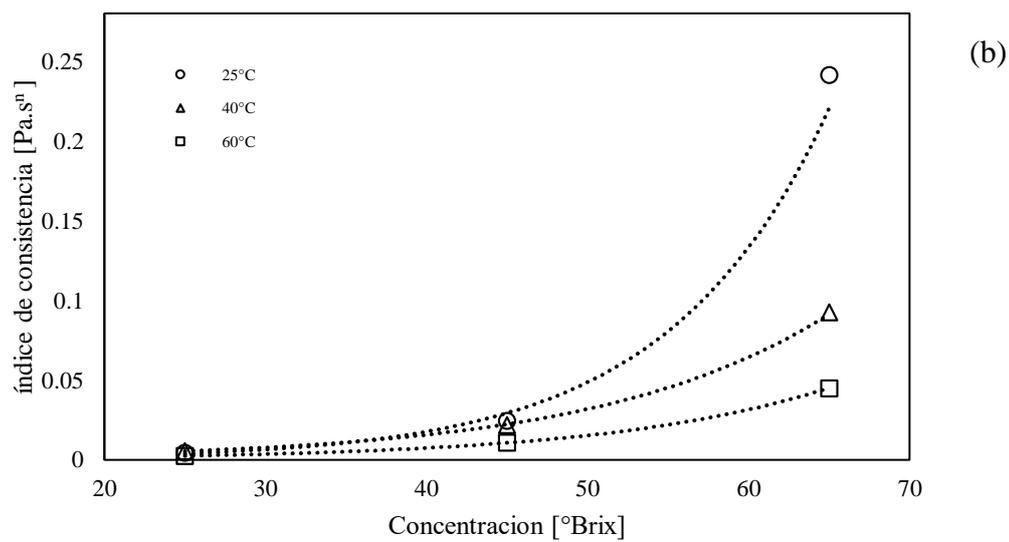
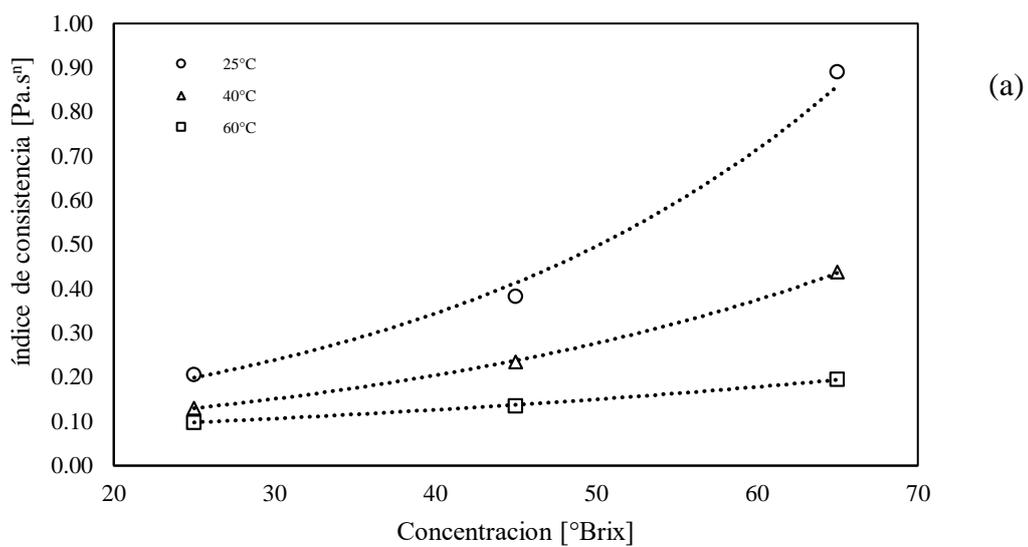


Figura 12. Índice de consistencia frente a la concentración a diferentes temperaturas de pulpa de sanky y aguaymanto

#### 4.2.3.3.Efecto combinado de la temperatura y concentración

En la Tabla 19 se presentaron parámetros de la influencia de la temperatura y concentración sobre el índice de consistencia. Las pulpas de sanky y aguaymanto mostraron valores similares para la energía de activación ( $E_a$ ), en ambos módulos (Ec 35 – Ec 36). Sin embargo, la energía de activación ( $E_a$ ) de la pulpa de aguaymanto ( $25.93 \pm 2.56E+00$  KJ/mol) fue mayor a la del sanky ( $24.289 \pm 2.37E-01$  KJ/mol). Así mismo, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de la pulpa de aguaymanto (0.925 - 0.954) fueron mas altos que los del sanky (0.828 - 0.869), debido a que ambas ecuaciones se ajustaron mejor a los datos experimentales.

Tabla 19. Parámetros de la influencia de la temperatura y concentración sobre el índice de consistencia

Modelo ajustado	$K = K_1 C^{n_1} e^{\frac{E_a}{RT}}$	$K = K_2 e^{\left(\frac{E_a}{RT} + n_2 C\right)}$
<b>Sanky</b>		
<b>Parámetros de los modelos</b>	$K_1 = (6.1058 \pm 3.124) * 10^{-7} \text{ Pa.s}^n$	$K_2 = (1.2638 \pm 0.713) * 10^{-5} \text{ Pa.s}^n$
	$n_1 = 1.033 \pm 8.30E-03$	$n_2 = 0.026 \pm 7.00E-04$
	$E_a = 24.267 \pm 2.07E-01 \text{ KJ/mol}$	$E_a = 24.289 \pm 2.37E-01 \text{ KJ/mol}$
	$R^2 = 0.828$	$R^2 = 0.869$
<b>Aguaymanto</b>		
<b>Parámetro de los modelos</b>	$K_1 = (5.68 \pm 2.83) * 10^{-12} \text{ Pa.s}^n$	$K_2 = (3.15 \pm 2.40) * 10^{-8} \text{ Pa.s}^n$
	$n_1 = 0.003 \pm 1.00E-04$	$n_2 = 0.079 \pm 3.00E-03$
	$E_a = 25.93 \pm 2.56E+00 \text{ KJ/mol}$	$E_a = 25.93 \pm 2.56E+00 \text{ KJ/mol}$
	$R^2 = 0.925$	$R^2 = 0.954$

#### **4.2.4. Efecto de la temperatura y la concentración sobre la viscosidad aparente**

La viscosidad aparente (mPa.s) de la pulpa de sanky, descendió de forma no lineal conforme se aumentaba la gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ) a una temperatura y concentración constante (Figura 13). La pulpa de aguaymanto presentó similar comportamiento bajo las mismas condiciones de temperatura y concentración (Figura 14). Así mismo, se evidenció que la viscosidad aparente se redujo cuando las temperaturas de las pulpas de sanky y aguaymanto fueron incrementadas, a una velocidad de cizalla y concentración determinada.

Este comportamiento es común en los fluidos pseudoplásticos, según lo mencionan Ortega et al (2015), que la viscosidad aparente disminuye a medida que aumente la velocidad de cizalla. Cuando las pulpas son sometidas a una tensión de corte, sus moléculas o partículas tienden a orientarse hacia la fuerza aplicada, cuanto mayor sea la fuerza aplicada, mayor será el orden de estas moléculas lo que lleva a un descenso en la viscosidad aparente. De igual forma la disminución de la viscosidad se puede atribuir a una restructuración espacial causada por el aumento en las distancias intermoleculares, debido a la expansión térmica causada por el aumento de la temperatura (Haminiuk et. al, 2006).

La viscosidad aparente de la pulpa de sanky y aguaymanto a 25 °Brix se encontraba en un menor rango en comparación a la de pulpa de 65 °Brix, al comparar las gráficas a, b y c de la Figura 13 y 14. Es decir, la viscosidad aparente es proporcional al incremento de la concentración de la pulpa, a una velocidad de cizalla y temperatura determinada. Cabe resaltar que la viscosidad aparente de la pulpa de sanky a las tres concentraciones fue mayor a la de la pulpa de aguaymanto en las mismas concentraciones. Se observó una tendencia general de la viscosidad a disminuir, los últimos puntos de las gráficas de las tres

temperaturas presentaron un ligero aumento o valores muy similares uno del otro. Es común observar estos casos en algunas de pulpas de frutas, como es la pulpa de mango estudiada por Sugai (2002), quién menciona que la viscosidad disminuyó con un aumento de temperatura de hasta 50 °C; sin embargo, a 60 °C, se observó una tendencia al aumento en la viscosidad. Esta tendencia de aumento se debe a un posible cambio de estado de algún componente de la pulpa.

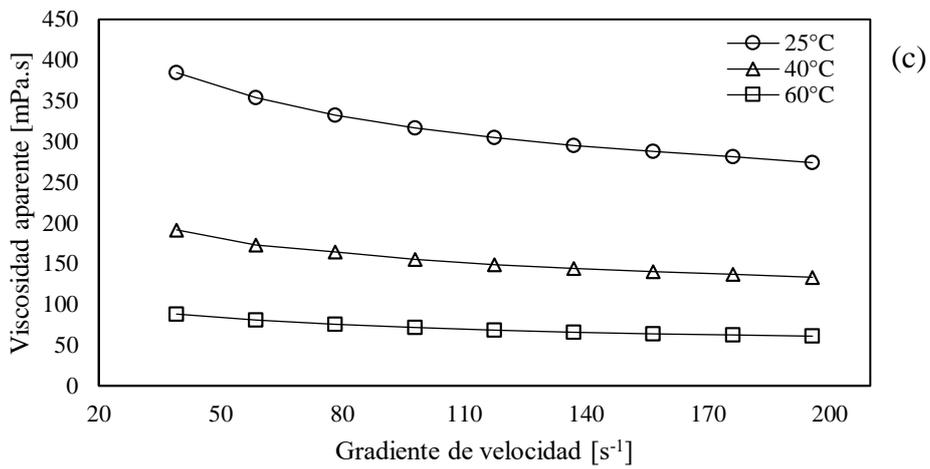
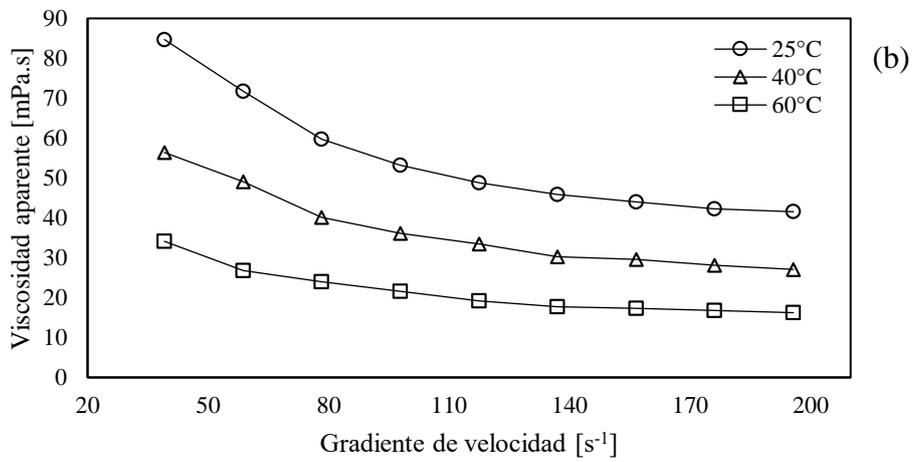
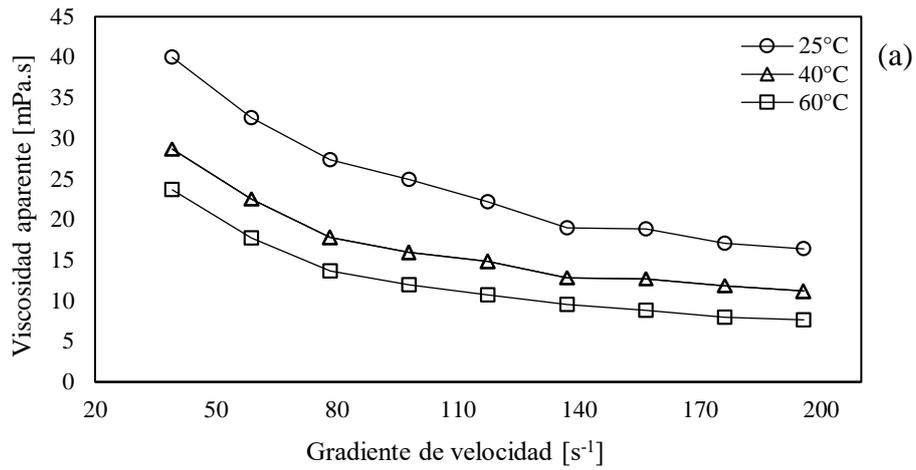


Figura 13. Viscosidad aparente frente a la gradiente de velocidad a diferentes temperaturas para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de sanky.

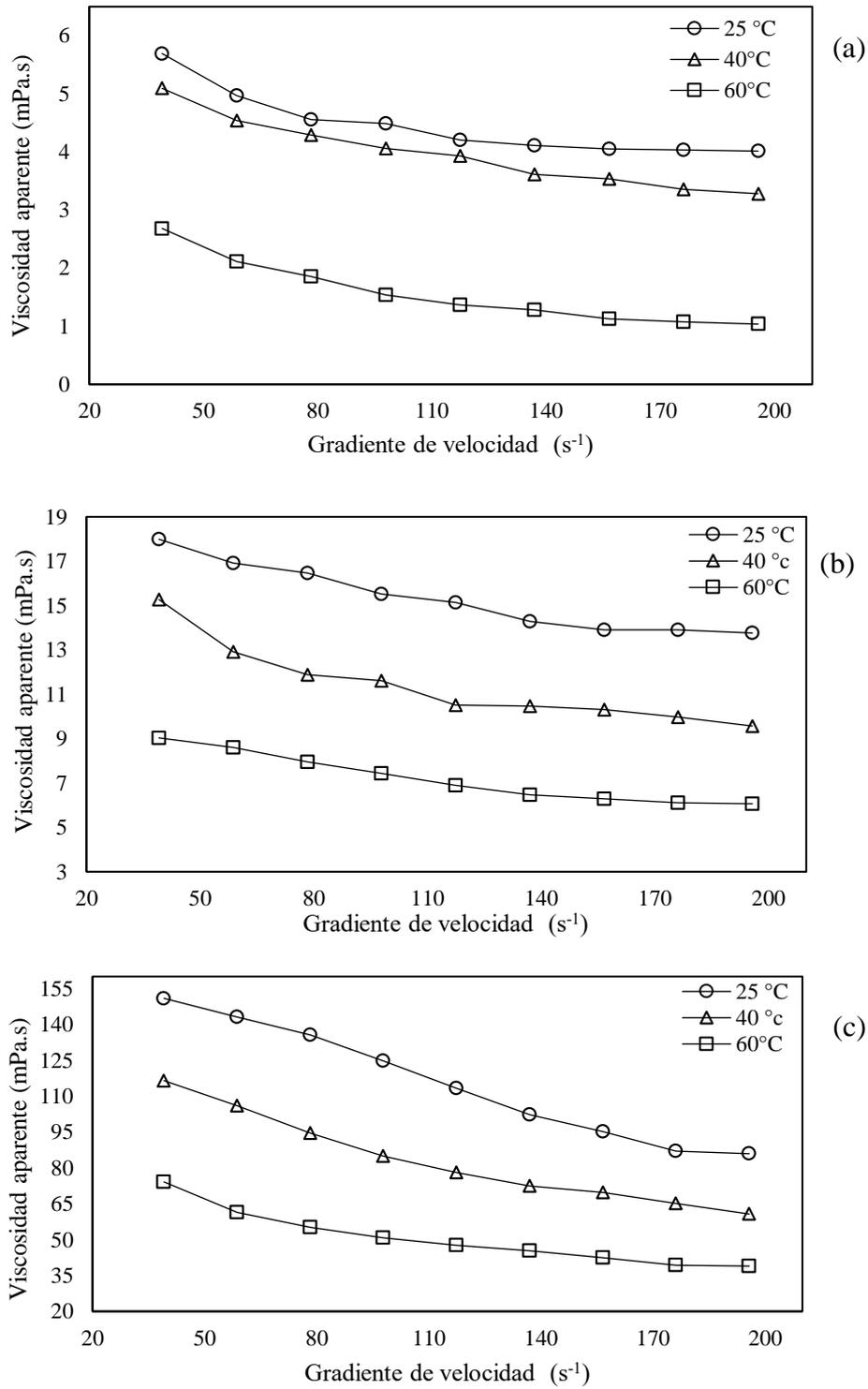


Figura 14. Viscosidad aparente frente a la gradiente de velocidad a diferentes temperaturas para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de aguaymanto.

#### ***4.2.4.1. Efecto de la temperatura***

Se encontró una relación lineal entre el logaritmo natural de la viscosidad aparente ( $\ln \eta_{app}$ ) y la inversa de la temperatura absoluta ( $1/T$ ) en la pulpa de sanky y aguaymanto, para cada concentración de pulpa a velocidades de cizalla desde 39.2 a 195.8  $s^{-1}$ , Figura 15 y 16 respectivamente. En ambos casos, el modelo de Arrhenius describió correctamente del efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de dichos frutos.

Los resultados encontrados para el modelo de Arrhenius (Ec. 35) sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky (Figura 15) fueron reportados en la Tabla 20. Se halló una relación inversa entre el parámetro  $\eta_0$  y la temperatura, es decir, los valores de  $\eta_0$  descendieron a medida que aumentaba la concentración, a una velocidad de cizalla específica, en un rango de 0.5692 hasta 0.0002 mPa.s.

Así mismo, los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Arrhenius (Ec. 30) en la pulpa de aguaymanto fueron reportados en la Tabla 21. En la pulpa de aguaymanto se encontró que los valores del parámetro  $\eta_0$  muestran una tendencia de descenso desde 0.3802 hasta 0.0002 mPa.s y fue inversamente proporcional al incremento de la concentración, en una misma velocidad de cizalla; un comportamiento similar a la pulpa de sanky.

Dichos resultados demostraron que la temperatura tiene un papel importante en las características reológicas de cualquier producto alimenticio. Además, demuestran que el esfuerzo cortante aumenta con la velocidad de corte a diferentes temperaturas. Los reogramas (Figura 7 y 8) muestra que a temperatura más alta muestra un aumento a un ritmo más lento en comparación con una temperatura más baja. Lo cual coincide con los datos

determinados por Guan et. al (2008) para los efectos de la temperatura sobre la viscosidad del zumo de fruta de dragón a una velocidad de cizallamiento de  $100 \text{ s}^{-1}$ . Lopes et. al (2013) estudiaron la influencia de la temperatura en la viscosidad aparente de la pulpa de cereza brasileña, mencionan que un ligero cambio en la temperatura puede afectar el comportamiento reológico, a medida que aumenta la temperatura, aumenta la energía térmica de las moléculas y se desarrollan distancias moleculares debido a la reducción de las fuerzas intermoleculares, por lo que la viscosidad del fluido disminuye.

Con respecto a la energía de activación ( $E_a$ ), para una misma concentración, se notó un aumento de estos valores a medida que se incrementó la velocidad de cizalla ( $39.2$  a  $195.8 \text{ s}^{-1}$ ). Estos valores variaron en un rango de  $11.88$  a  $35.48 \text{ KJ/mol}$  para la pulpa de sanky (Tabla 20) y un rango de  $8.39$  a  $35.97 \text{ KJ/mol}$  para la pulpa de aguaymanto (Tabla 21). El orden de magnitud de la energía de activación indica la dependencia de la viscosidad hacia la temperatura. Estos valores de energía de activación indican la sensibilidad de la viscosidad aparente frente al cambio de la temperatura, los valores más altos de  $E_a$  significan que la viscosidad aparente es relativamente más sensible a los cambios de temperatura (Togrul & Arslan, 2004). Estudios realizados en otras pulpas de frutas reportan que el valor encontrado para la  $E_a$  de la pulpa de cereza brasileña a  $100 \text{ s}^{-1}$  (velocidad de cizalla de referencia) fue  $12.33 \text{ KJ/mol}$  (Lopes et. al, 2013), para pulpa de mango variedad Tommy a  $93 \text{ s}^{-1}$  fue  $10.58 \text{ KJ/mol}$  (Ortega et. al, 2015) y para pulpa de araçá a  $50 \text{ s}^{-1}$  fue  $11.03 \text{ KJ/mol}$  (Haminiuk et. al, 2006). Estos valores encontrados en la literatura son similares con los datos obtenidos para la pulpa de sanky y aguaymanto; no obstante, la diferencia entre los valores se debe a la concentración de las pulpas. En un estudio desarrollado por Chin et al. (2009), la mayor energía de activación se obtuvo en una concentración intermedia. El mismo autor menciona que hay informes inconsistentes sobre los cambios de la energía de activación con respecto

a la concentración. Mientras que algunos autores observan que la energía de activación es más alta en productos menos concentrados, otros, como Lopes et. al (2013), informan que la energía de activación más alta se presenta en la concentración máxima de sólidos solubles.

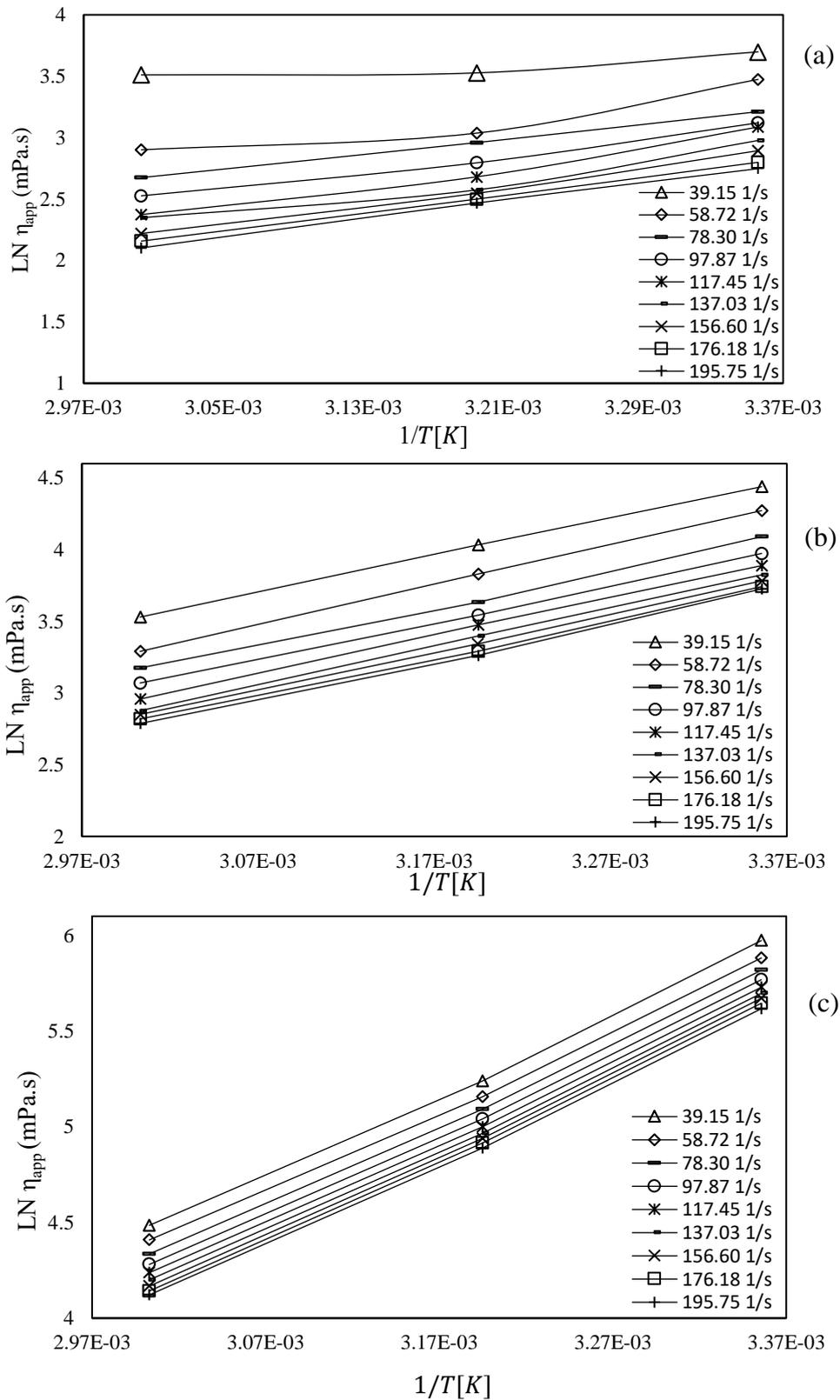


Figura 15. Viscosidad aparente frente a la inversa de la temperatura a diferentes gradientes de velocidad para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de sanky.

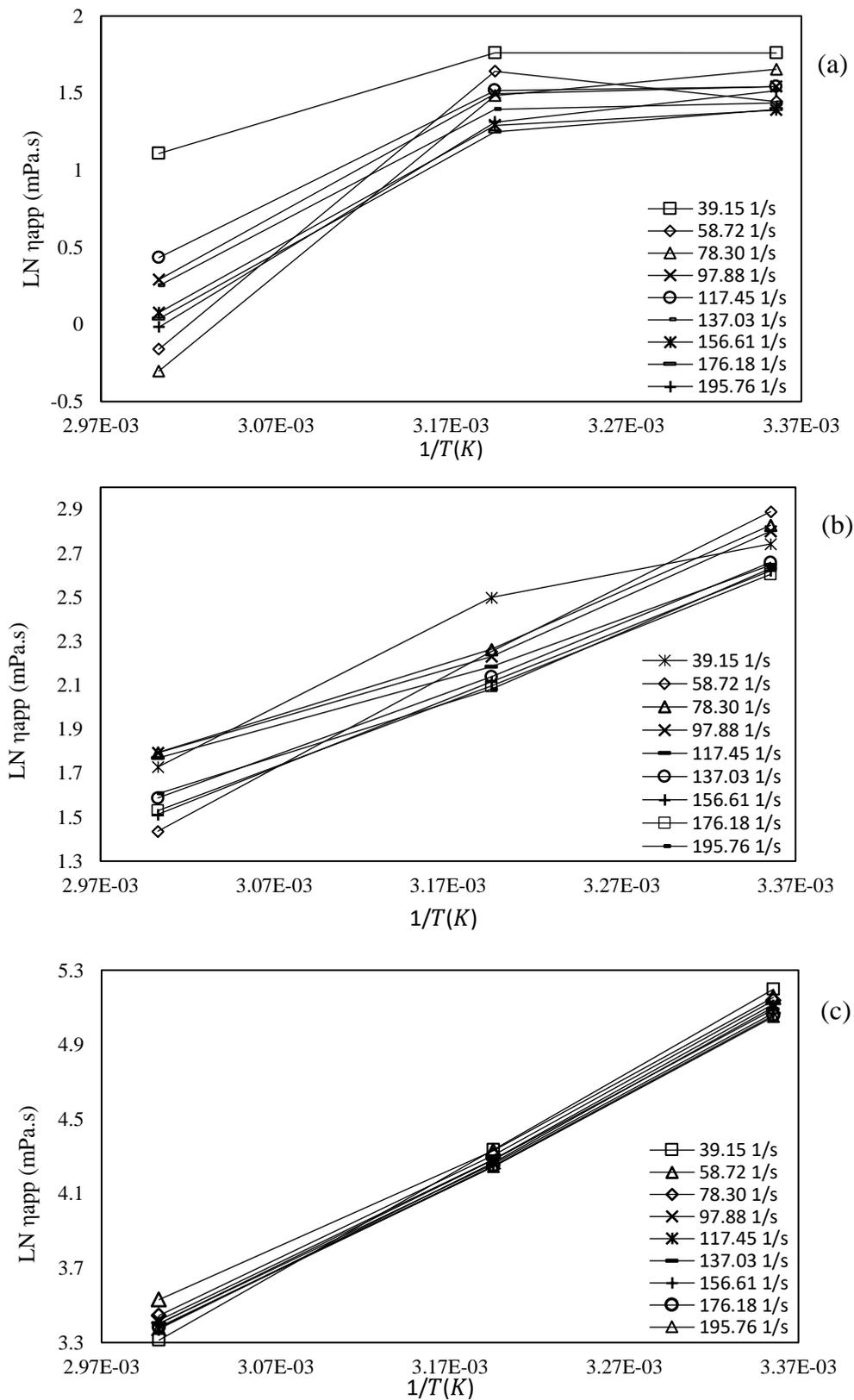


Figura 16. Viscosidad aparente frente a la inversa de la temperatura a diferentes gradientes de velocidad para 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix (c), en pulpa de aguaymanto.

Tabla 20. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a diferentes concentraciones y velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [s <sup>-1</sup> ]	Concentración [°Brix]	$\eta_0$ [mPa.s]	Ea [KJ/mol]	R <sup>2</sup>
39.2	25	0.5692 ± 4.65E-01	11.88 ± 8.20E-01	0.97
	45	0.0242 ± 1.32E-02	21.43 ± 3.00E-02	0.99
	65	0.0004 ± 2.00E-04	34.81 ± 2.70E-01	0.99
58.7	25	0.2132 ± 9.88E-02	13.45 ± 2.60E-01	0.94
	45	0.0051 ± 1.60E-03	23.74 ± 8.20E-01	0.99
	65	0.0004 ± 2.00E-04	34.76 ± 1.40E-01	0.99
78.3	25	0.0936 ± 8.06E-02	16.47 ± 2.40E-01	0.98
	45	0.0073 ± 3.70E-03	23.55 ± 2.00E-02	0.99
	65	0.0003 ± 1.00E-04	34.87 ± 1.00E-02	0.99
97.9	25	0.0522 ± 4.02E-02	17.53 ± 5.60E-01	0.97
	45	0.0068 ± 4.20E-03	21.53 ± 3.40E-01	0.99
	65	0.0003 ± 1.00E-04	35.03 ± 4.00E-02	0.99
117.5	25	0.0237 ± 2.40E-03	16.88 ± 2.90E-01	0.98
	45	0.0057 ± 1.70E-03	21.57 ± 5.50E-01	0.99
	65	0.0003 ± 1.00E-04	35.17 ± 1.20E-01	0.99
137.0	25	0.0388 ± 1.66E-02	16.41 ± 3.60E-01	0.97
	45	0.0073 ± 2.40E-03	21.87 ± 6.80E-01	0.99
	65	0.0002 ± 1.00E-04	35.29 ± 1.10E-01	0.99
156.6	25	0.0219 ± 1.15E-02	17.84 ± 2.00E-02	0.99
	45	0.0049 ± 1.90E-03	21.71 ± 3.50E-01	0.99
	65	0.0003 ± 2.00E-04	35.45 ± 8.00E-02	0.99
176.2	25	0.0244 ± 1.76E-02	17.54 ± 6.10E-01	0.99
	45	0.0061 ± 6.00E-04	21.43 ± 4.30E-01	0.99
	65	0.0002 ± 1.00E-04	35.48 ± 1.30E-01	0.99
195.8	25	0.0227 ± 1.56E-02	15.62 ± 4.30E-01	0.99
	45	0.0058 ± 4.00E-04	22.46 ± 5.30E-01	0.99
	65	0.0002 ± 1.00E-04	35.24 ± 8.00E-02	0.99

Tabla 21. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a diferentes concentraciones y velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [s <sup>-1</sup> ]	Concentración [°Brix]	$\eta_0$ [mPa.s]	Ea [KJ/mol]	R <sup>2</sup>
39.2	25	0.380 ± 1.60E-03	8.39 ± 4.37E+00	0.74
	45	0.109 ± 5.24E-02	18.45 ± 8.17E+00	0.94
	65	0.001 ± 2.00E-04	41.34 ± 4.37E+00	0.99
58.7	25	0.257 ± 5.00E-04	25.98 ± 1.18E+01	0.65
	45	0.001 ± 1.00E-04	28.71 ± 1.34E+01	0.96
	65	0.001 ± 2.00E-04	32.96 ± 8.76E+00	0.85
78.3	25	0.167 ± 4.60E-02	19.63 ± 6.52E+00	0.81
	45	0.003 ± 2.20E-03	26.33 ± 5.54E+00	0.92
	65	0.001 ± 1.00E-04	39.60 ± 2.00E-04	0.99
97.9	25	0.093 ± 1.50E-03	20.98 ± 3.71E+00	0.77
	45	0.003 ± 5.00E-04	29.88 ± 5.19E-01	0.97
	65	0.001 ± 1.00E-04	39.47 ± 6.56E-01	0.99
117.5	25	0.078 ± 7.00E-04	15.87 ± 6.69E+00	0.80
	45	0.006 ± 1.07E-02	29.72 ± 4.13E+00	0.85
	65	0.001 ± 1.00E-04	40.52 ± 9.77E-01	0.99
137.0	25	0.023 ± 2.40E-03	22.65 ± 3.63E+00	0.81
	45	0.002 ± 2.00E-04	32.25 ± 5.11E+00	0.99
	65	0.001 ± 2.00E-05	39.97 ± 3.53E-01	0.99
156.6	25	0.011 ± 1.20E-03	24.11 ± 2.85E+00	0.83
	45	0.005 ± 3.10E-03	29.16 ± 1.42E+01	0.99
	65	0.002 ± 1.00E-04	34.01 ± 3.35E+00	0.85
176.2	25	0.007 ± 3.00E-04	24.58 ± 1.04E+00	0.84
	45	0.003 ± 1.20E-04	35.33 ± 1.89E+00	0.99
	65	0.001 ± 9.00E-05	39.48 ± 1.19E-01	0.99
195.8	25	0.005 ± 3.00E-04	24.18 ± 1.81E-01	0.85
	45	0.002 ± 7.00E-04	39.39 ± 3.60E+00	0.99
	65	0.001 ± 3.00E-05	39.57 ± 3.92E-01	0.99

#### 4.2.4.2. Efecto de la concentración

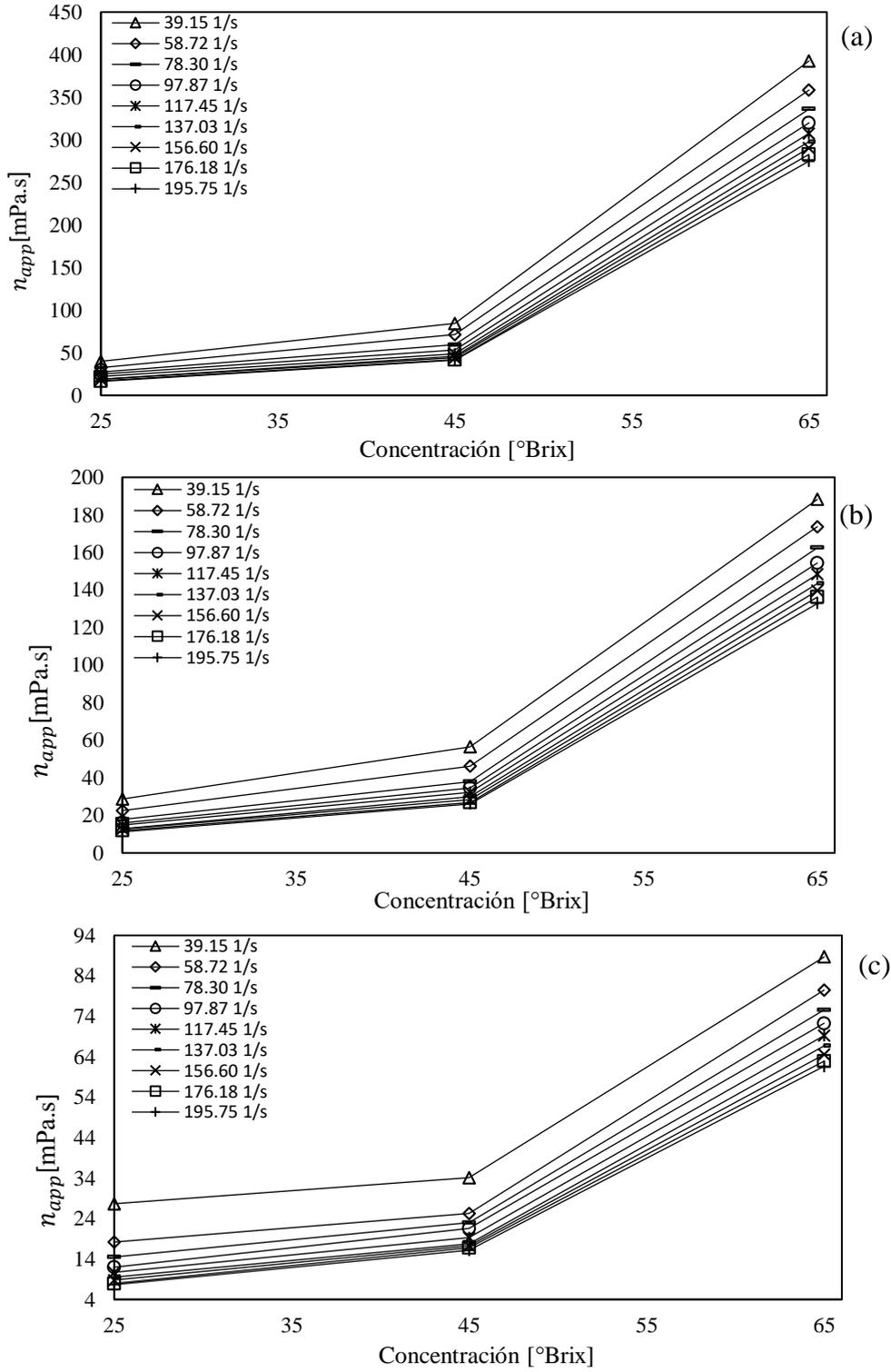


Figura 17. Viscosidad aparente frente a la concentración a diferentes gradientes de velocidad para 20 (a), 40 (b) y 60 °C (c), en pulpa de sanky.

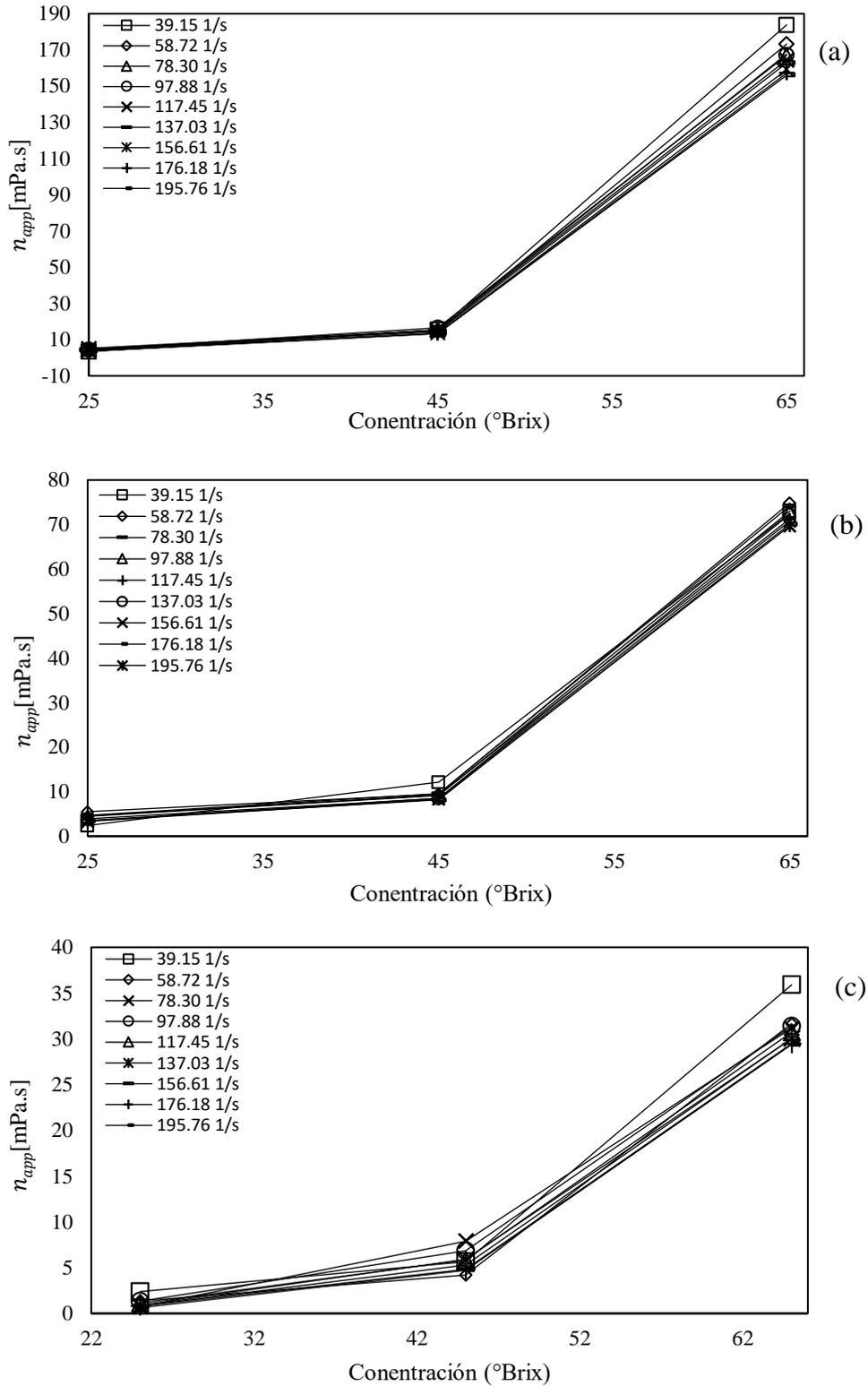


Figura 18. Viscosidad aparente frente a la concentración a diferentes gradientes de velocidad para 20°C (a), 40°C (b) y 60 °C (c), en pulpa de aguaymanto.

En base a la Ec. 36 se evaluó la interacción entre la viscosidad aparente y la concentración de la pulpa a una velocidad de cizalla y temperatura constante fue representada por una regresión exponencial, Figura 17 para la pulpa de sanky y 18 para la pulpa de aguaymanto. En ambas pulpas de frutas se evidenció una relación proporcional entre la viscosidad aparente y la concentración de la pulpa, e inversamente proporcional a la velocidad de cizalla; es decir, la viscosidad aparente ascendió cuando se incrementó la concentración en las pulpas y descendió cuando la velocidad de cizalla aumentó. Así mismo, se comparó las tres gráficas contenidas en dichas figuras y se observó que el aumento de la temperatura ocasionó que la viscosidad aparente se encuentre en rangos menores. Juszczak & Fortuna (2003) mencionan que la concentración de sólidos solubles e insolubles tiene un fuerte efecto no lineal sobre la viscosidad de los alimentos líquidos newtonianos y la viscosidad aparente de los alimentos no newtonianos.

Los resultados que fueron obtenidos a partir de las figuras mencionadas en el párrafo anterior han sido reportados en la Tabla 22 (pulpa de sanky) y Tabla 23 (pulpa de aguaymanto). En la pulpa de sanky los valores de  $\eta_1$  presentaron un ligero incremento cuando la temperatura aumentaba, en un rango de 0.002 a 1.039 mPa.s. Caso opuesto es con el parámetro  $\alpha$ , el cual disminuyó cuando la temperatura aumentaba, en un rango de valores de 2.849 a 1.038. En la pulpa de aguaymanto se observó que los valores de  $\eta_1$  también presentaron una relación proporcional al incremento de la temperatura, ubicados en un rango de 0.001 a 0.465 mPa.s. En el parámetro  $\alpha$  la tendencia también fue descendente e inversamente proporcional al aumento de la temperatura, en un rango de 4.914 a 2.598. Ambos parámetros indicaron que la influencia de la concentración sobre la viscosidad aparente, tanto en la pulpa de sanky como del aguaymanto, es mayor cuando la temperatura de las pulpas es baja. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Bustamente et. al

(2016), quienes estudiaron la pulpa de aguaymanto a concentraciones menores a 28 °Brix. Estos mismos autores mencionan que el efecto que ejerce la concentración sobre un sistema homogéneo es el aumentar la viscosidad.

Tabla 22. Efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a diferentes temperaturas y velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [ s <sup>-1</sup> ]	Temperatura (°C)	$\eta_1$ [mPa.s]	$\alpha$	R <sup>2</sup>
39.2	25	0.023 ± 1.70E-03	2.273 ± 2.00E-02	0.89
	40	0.087 ± 4.20E-02	1.807 ± 1.23E-01	0.89
	60	1.039 ± 5.89E-01	1.038 ± 1.43E-01	0.76
58.7	25	0.012 ± 1.00E-04	2.4 ± 3.00E+00	0.89
	40	0.023 ± 5.50E-03	2.098 ± 6.40E-02	0.93
	60	0.164 ± 3.22E-02	1.434 ± 4.30E-02	0.81
78.3	25	0.006 ± 2.20E-03	2.556 ± 7.40E-02	0.89
	40	0.014 ± 3.00E-03	2.183 ± 4.80E-02	0.91
	60	0.266 ± 2.85E-01	1.682 ± 6.00E-02	0.88
97.9	25	0.005 ± 1.30E-03	2.576 ± 1.01E-01	0.89
	40	0.009 ± 6.00E-04	2.269 ± 1.20E-02	0.91
	60	0.037 ± 6.40E-03	1.766 ± 4.80E-02	0.88
117.5	25	0.004 ± 1.00E-04	2.628 ± 1.00E-02	0.89
	40	0.007 ± 4.00E-04	2.32 ± 1.80E-02	0.91
	60	0.024 ± 1.10E-03	1.856 ± 1.30E-02	0.89
137.0	25	0.002 ± 3.00E-04	2.734 ± 2.80E-02	0.89
	40	0.005 ± 2.00E-04	2.416 ± 1.30E-02	0.91
	60	0.02 ± 6.30E-03	1.894 ± 7.40E-02	0.89
156.6	25	0.002 ± 3.00E-04	2.754 ± 3.40E-02	0.89
	40	0.004 ± 7.00E-04	2.406 ± 3.00E-03	0.91
	60	0.014 ± 2.30E-03	1.965 ± 4.40E-02	0.89
176.2	25	0.002 ± 2.00E-04	2.827 ± 2.80E-02	0.89
	40	0.004 ± 3.00E-04	2.438 ± 1.50E-02	0.90
	60	0.011 ± 3.20E-03	2.027 ± 7.40E-02	0.91
195.8	25	0.001 ± 2.00E-04	2.849 ± 3.50E-02	0.90
	40	0.004 ± 6.00E-04	2.457 ± 3.40E-02	0.91
	60	0.009 ± 2.30E-03	2.057 ± 6.20E-02	0.91

Tabla 23. Efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a diferentes temperaturas y velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [ s <sup>-1</sup> ]	Temperatura (°C)	$\eta_1 * 10^2$ [mPa.s]	$\alpha$	R <sup>2</sup>
39.2	25	0.010 ± 1.00E-03	3.709 ± 4.33E-01	0.92
	40	0.028 ± 4.00E-03	3.056 ± 4.89E-01	0.97
	60	0.465 ± 4.90E-02	2.992 ± 7.01E-01	0.87
58.7	25	0.002 ± 3.00E-03	4.914 ± 1.57E+00	0.95
	40	0.004 ± 3.00E-04	3.283 ± 1.69E-01	0.81
	60	0.095 ± 2.10E-02	2.598 ± 4.90E-02	0.88
78.3	25	0.005 ± 2.00E-03	3.724 ± 1.58E-01	0.96
	40	0.010 ± 1.40E-02	3.397 ± 7.49E-01	0.84
	60	0.045 ± 7.00E-03	2.766 ± 4.30E-02	0.97
97.9	25	0.004 ± 1.00E-03	3.602 ± 5.10E-02	0.91
	40	0.017 ± 1.90E-02	2.978 ± 3.91E-01	0.83
	60	0.070 ± 2.80E-02	2.687 ± 1.13E-01	0.96
117.5	25	0.003 ± 1.00E-03	3.613 ± 6.60E-02	0.89
	40	0.006 ± 5.00E-03	3.497 ± 9.70E-02	0.85
	60	0.050 ± 1.40E-02	2.799 ± 1.07E-01	0.94
137.0	25	0.002 ± 4.00E-04	3.414 ± 3.26E-01	0.92
	40	0.006 ± 2.00E-03	3.361 ± 5.39E-01	0.85
	60	0.035 ± 7.00E-03	2.860 ± 4.90E-02	0.97
156.6	25	0.002 ± 4.00E-04	3.735 ± 5.30E-02	0.90
	40	0.002 ± 1.00E-03	3.534 ± 2.49E-01	0.87
	60	0.023 ± 4.00E-03	2.968 ± 5.00E-02	0.97
176.2	25	0.001 ± 1.00E-03	3.72 ± 6.10E-02	0.90
	40	0.002 ± 1.00E-03	3.553 ± 1.98E-01	0.87
	60	0.026 ± 8.00E-03	2.977 ± 8.00E-03	0.97
195.8	25	0.001 ± 1.00E-03	3.719 ± 3.51E-01	0.89
	40	0.003 ± 2.00E-03	3.637 ± 1.35E-01	0.86
	60	0.025 ± 7.00E-03	2.962 ± 9.50E-02	0.98

#### ***4.2.4.3. Efecto combinado de la temperatura y concentración***

Se aplicó la Ec. 37 para evaluar también el efecto combinado de la temperatura y la concentración sobre la viscosidad aparente, los resultados para la pulpa de sanky y aguaymanto son reportados en las Tablas 24 y 25, respectivamente. En ambos casos se apreció que el parámetro  $\delta$  va disminuyendo conforme se incremente la velocidad de cizalla. En la pulpa de sanky los valores de este parámetro variaron en un rango 10.9 a 91.9 mPa.s y en la pulpa de aguaymanto desde 6.7 a 29.7 mPa.s. Los datos del parámetro  $\epsilon$  tienen un ligero aumento que es proporcional al aumento de la velocidad de cizalla, en ambas pulpas: el rango en la pulpa de sanky fue de 1.71 a 2.56 y en la pulpa de aguaymanto fue de 3.09 a 3.45. En base a estos parámetros, se encontró que la temperatura y la concentración tienen un efecto combinado mayor cuando la velocidad de cizalla es menor. Las energías de activación ( $E_a$ ) en la pulpa de sanky y aguaymanto son similares una de la otra, se tiene un aumento insignificante, lo que da a entender que la temperatura y la concentración no afecta significativamente en este parámetro.

Tabla 24. Efecto combinado de la temperatura y concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de sanky, a velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [s <sup>-1</sup> ]	$\delta * 10^4$ [mPa.s]	$\epsilon$	Ea [KJ/mol]	R <sup>2</sup>
39.2	91.98 ± 6.67E-02	1.71 ± 9.53E-02	0.31 ± 2.34E-02	0.79
58.7	75.21 ± 5.57E+00	1.98 ± 3.45E-02	0.35 ± 8.74E-03	0.84
78.3	52.15 ± 4.19E+00	2.14 ± 1.15E-02	0.35 ± 9.32E-03	0.85
97.9	35.83 ± 8.03E-02	2.21 ± 4.81E-03	0.36 ± 4.40E-03	0.86
117.5	26.16 ± 7.09E-01	2.27 ± 5.37E-03	0.37 ± 3.14E-03	0.86
137.0	18.77 ± 3.47E+00	2.35 ± 3.83E-02	0.36 ± 6.55E-03	0.86
156.6	15.58 ± 3.37E-01	2.38 ± 2.23E-03	0.37 ± 2.37E-03	0.86
176.2	12.3 ± 1.41E+00	2.43 ± 2.06E-02	0.36 ± 9.27E-03	0.86
195.8	10.91 ± 1.31E+00	2.45 ± 2.03E-02	0.36 ± 1.14E-02	0.87

Tabla 25. Efecto combinado de la temperatura y concentración sobre la viscosidad aparente de la pulpa de aguaymanto, a velocidad de cizalla constante.

Velocidad de cizalla [s <sup>-1</sup> ]	$\delta * 10^6$ [mPa.s]	$\epsilon$	Ea [KJ/mol]	R <sup>2</sup>
39.2	29.70 ± 1.11E+00	3.09 ± 1.50E-01	4.46 ± 2.29E-01	0.93
58.7	26.77 ± 1.03E+00	3.12 ± 7.00E-02	4.4 ± 4.28E-01	0.84
78.3	24.51 ± 2.07E-01	3.2 ± 1.50E-01	4.16 ± 4.34E-02	0.87
97.9	23.32 ± 7.78E+00	3.23 ± 7.00E-02	4.03 ± 1.88E-01	0.85
117.5	18.23 ± 7.93E+00	3.33 ± 1.40E-01	4.39 ± 3.28E-02	0.86
137.0	11.72 ± 6.29E+00	3.39 ± 4.30E-01	4.48 ± 2.63E-02	0.86
156.6	7.49 ± 3.24E+00	3.41 ± 1.20E-01	4.62 ± 2.42E-02	0.87
176.2	7.02 ± 2.56E+00	3.42 ± 9.00E-02	4.67 ± 5.59E-02	0.87
195.8	6.68 ± 5.20E+00	3.45 ± 2.10E-01	4.87 ± 9.82E-02	0.87

#### 4.2.5. Parámetros viscoelásticos

Se obtuvo los resultados de los ensayos experimentales oscilatorios, los cuales fueron expresados en módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ) en función de la frecuencia para la pulpa sanky (Figura 19) y aguaymanto (Figura 20) a una concentración de 65°Brix a temperaturas de 25, 40 y 60 °C. Ambos frutos presentaron diferencias cuantitativas en las magnitudes de los parámetros viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ). El sanky reveló un comportamiento semi-sólido para el rango de la frecuencia estudiado, donde la característica elástica predominó sobre la viscosa ( $G' > G''$ ). Así mismo, la muestra a 25 °C evidenció una gran influencia de la frecuencia sobre el comportamiento y carácter de la pulpa, ya que los valores más bajos denotaron un comportamiento semi-líquido, donde predominó el carácter elástico sobre el viscoso ( $G' > G''$ ) y los más altos un comportamiento semi-sólido, donde predominó el carácter viscoso sobre el elástico ( $G'' > G'$ ). De acuerdo con Rao (1999), la pulpa sanky se asemejó a un gel débil. Cabe resaltar que este comportamiento fue reportado por otros alimentos como la pulpa de acai (Tonon et al., 2009), pulpa de siriguela (Augusto et al., 2012) y pulpa de umbu (Pereira et al., 2008).

En la pulpa de aguaymanto a 25 y 40 °C se observó un comportamiento semi-líquido, ya que predominó la característica viscosa frente a la elástica ( $G'' > G'$ ). Sin embargo, los valores de  $G'$  fueron mayores a los de  $G''$  para la pulpa de aguaymanto a 60 °C, lo cual evidenció un comportamiento semi-sólido, donde predominó la característica elástica sobre la viscosa ( $G' > G''$ ). Por ende, el incremento de la temperatura y frecuencia originó la variación de los módulos oscilatorios.

La pulpa de sanky mostró un incremento de los valores de los módulos oscilatorios ( $G'$  y  $G''$ ) conforme se elevó la temperatura. Estos resultados son respaldados por Sato y

Cunha (2007), ya que al estudiar la pulpa de jabuticaba observaron un comportamiento similar. Esto podría ser atribuido a la reducción parcial de agua presente en las pulpas, debido al largo tiempo de experimentación o inicio de gelificación originado por el contenido de pectina natural. Sin embargo, las muestras de aguaymanto a 25 y 40 °C reflejaron una tendencia opuesta a la presentada por el sanky; lo cual indicó que su estructura interna, promovido por las pectinas, es más débil a temperaturas más altas.

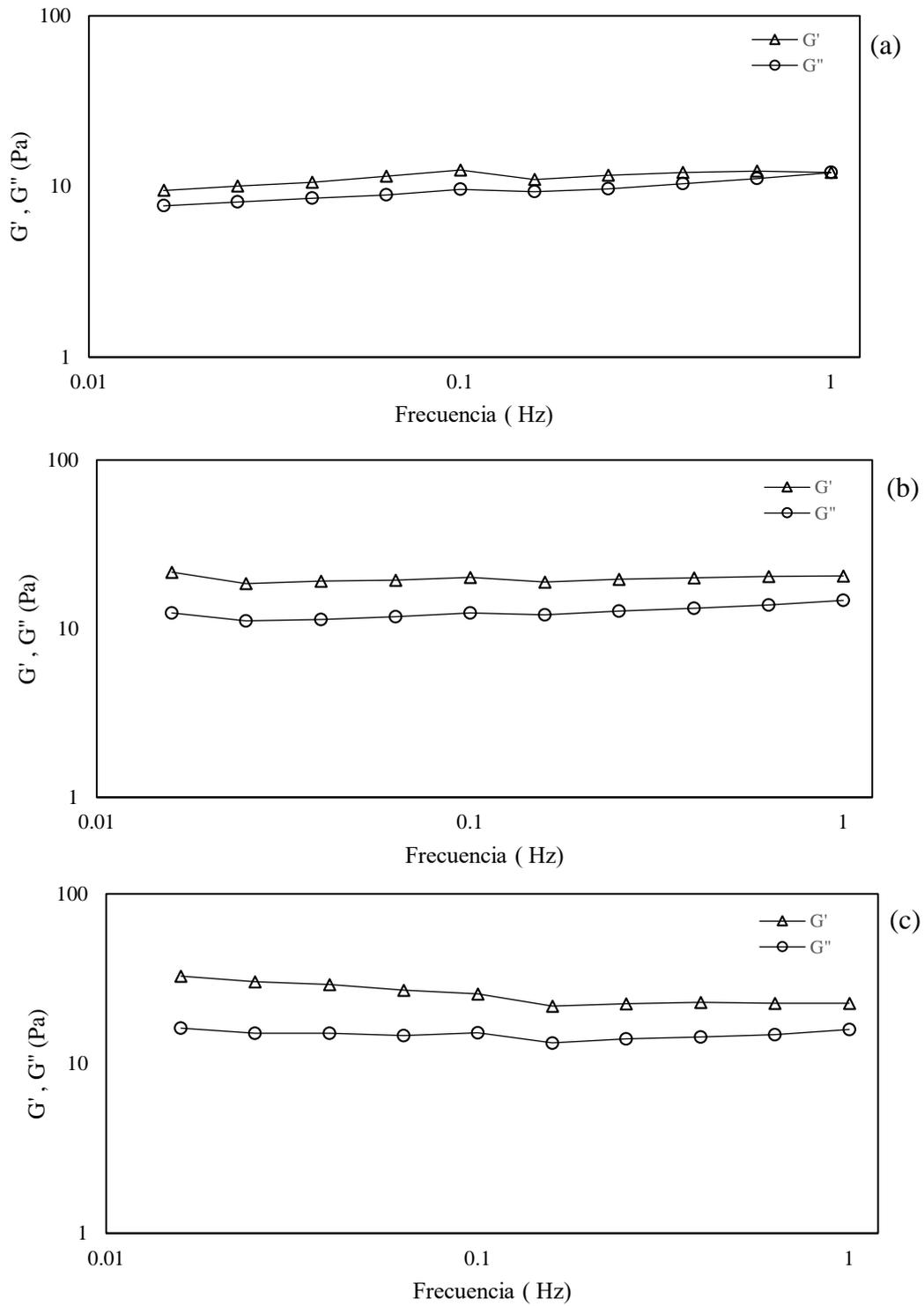


Figura 19. Valores del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ) en función de la frecuencia para la pulpa sanky para una concentración de 65°Brix a temperaturas de 25°C (a), 40°C (b) y 60°C (c).

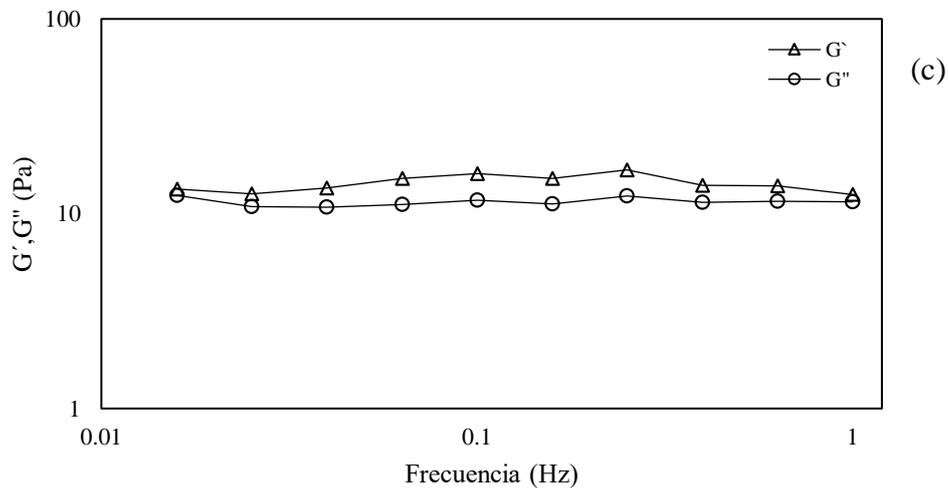
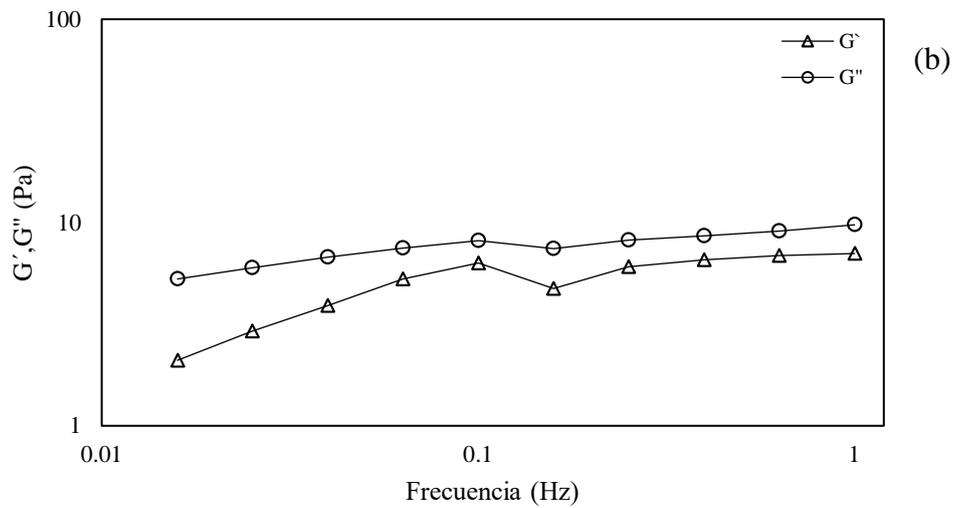
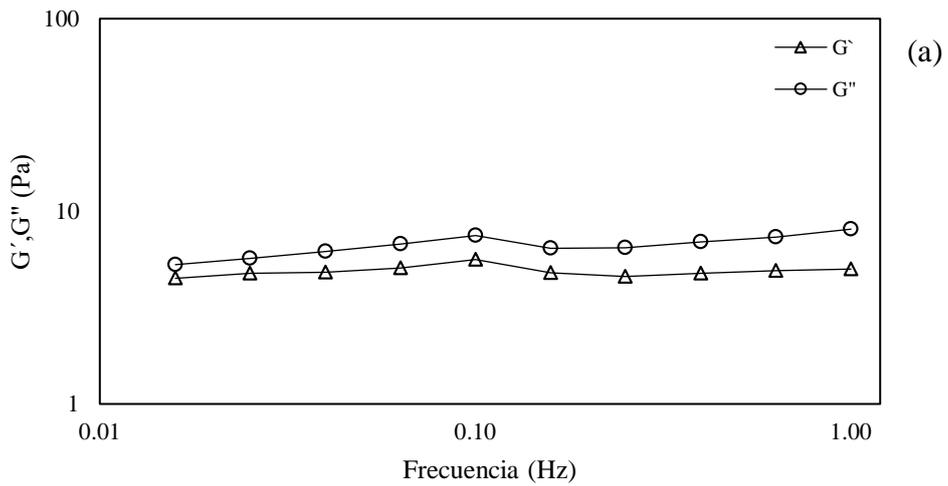


Figura 20. Valores del módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ ) en función de la frecuencia para la pulpa aguaymanto para una concentración de 65°Brix a temperaturas de 25 (a), 40 (b) y 60°C (c).

Se graficó el efecto de la temperatura sobre la viscosidad compleja ( $\eta_c^*$ ) para la pulpa de sanky (Figura 21 a) y aguaymanto (Figura 21 b) a la concentración de 65 °Brix, en función de la frecuencia. Se observó que la viscosidad compleja del sanky (Figura 21 a) se incrementó a alta temperatura (60°C) y se redujo a baja frecuencia. No obstante, en la Figura 21 b, correspondiente a la pulpa de aguaymanto, no se observó una diferencia significativa entre los valores que conforman las rectas de las tres temperaturas. Cabe decir que los valores de  $\eta_c^*$  de la pulpa de sanky son más altas en comparación con la pulpa de aguaymanto.

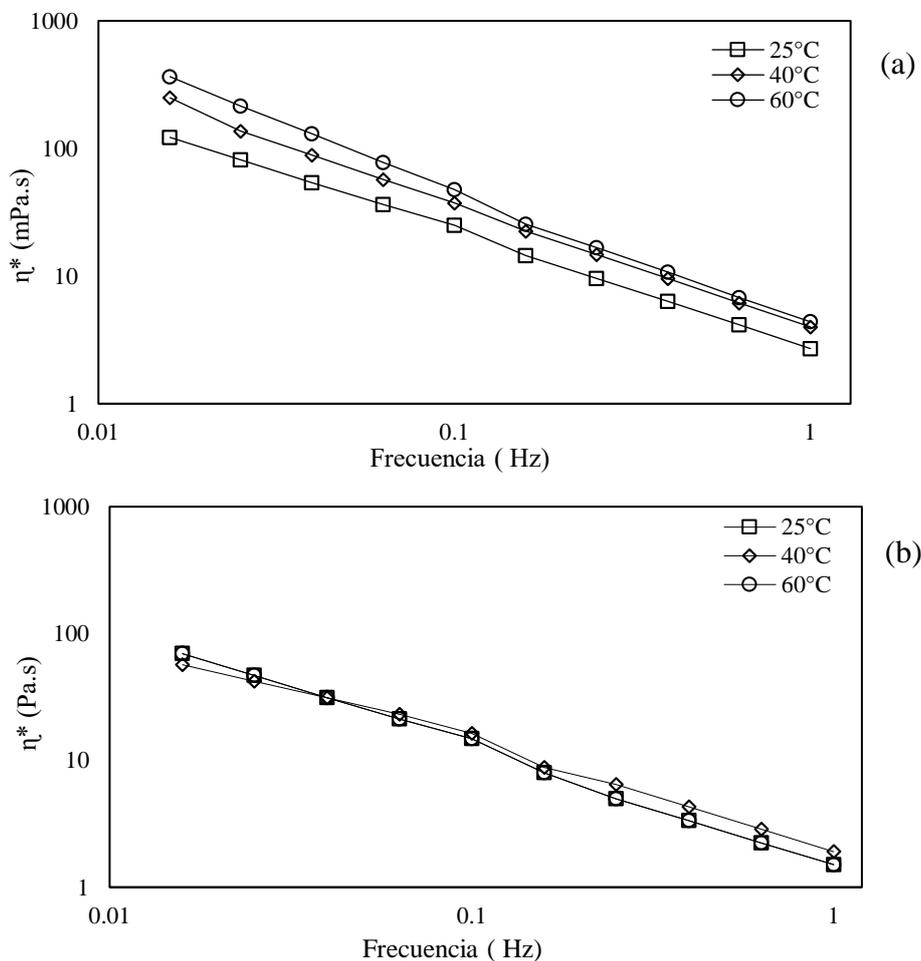


Figura 21. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad compleja ( $\eta_c^*$ ) para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b) a una concentración de 65°Brix

Los valores de la tangente del ángulo de fase ( $\text{Tan } \delta$ ) para la pulpa de sanky y aguaymanto a una concentración de 65 °Brix se presentan en la Figura 22a y 22 b, respectivamente. Se pudo apreciar que, en la pulpa de sanky, para el rango de frecuencia estudiado, las tres temperaturas presentaron una pendiente cercana a cero; por ende, su carácter predominante fue elástico. Por otro lado, la pulpa de aguaymanto a 40 °C presentó una pendiente más pronunciada a la de 60 °C, debido a que esta última fue cercana a cero. Sin embargo, la muestra a 25 °C debido a su carácter predominantemente viscoso y bajos valores de viscosidad compleja, presentó un comportamiento distinto.

Ramos & Ibarz (2006), mencionan que la  $\text{Tan } (\delta)$  indica el predominio de la propiedad elástica o viscosa, y compara la cantidad de energía perdida durante un ensayo oscilatorio con la cantidad de energía almacenada durante este periodo. Asimismo, Pereira et al (2008) afirman que los alimentos que presentan una  $\text{Tan } (\delta)$  mayor a 0.1 suelen caracterizarse como geles débiles, lo que significa que no es un verdadero gel. De acuerdo con lo mencionado anteriormente ambos frutos se caracterizarían de esa forma. Este tipo de comportamiento fue reportado para la pulpa de mango (Iagher et al., 2002), la pulpa assai (Alexandre, 2002), la pulpa de jaboticaba (Sato, 2005) y las dispersiones de harina de arroz (Chun y Yoo, 2004),

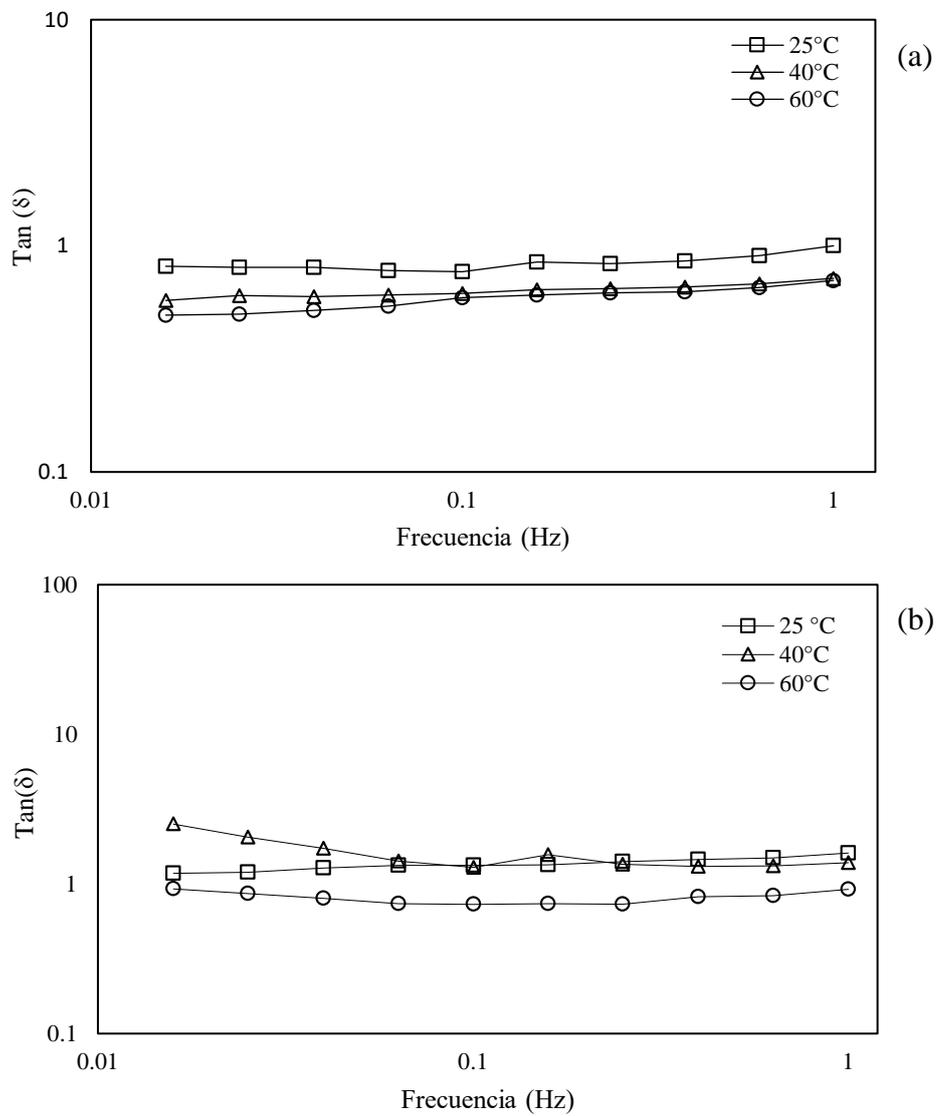


Figura 22. Efecto de la temperatura sobre la función de pérdida ( $\text{Tan } \delta$ ) para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b) a una concentración de 65°Brix

#### 4.2.5.1. Análisis estadístico de las propiedades viscoelásticas

Se realizó un análisis estadístico, ANNOVA, para evaluar el efecto de la temperatura en módulos oscilatorios ( $G'$  y  $G''$ ), viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) y  $\text{Tan } \delta$  de la pulpa de aguaymanto a 65 °Brix, todos los datos de las variables respuesta fueron tomados a 1 Hz de frecuencia. En la Tabla 26 se reportan los resultados obtenidos para la pulpa de sanky y aguaymanto. Respecto al aguaymanto, se observó que el p-valor para todas las variables dependientes es  $< 0.05$ , lo cual indica que la variable independiente (Temperatura °C) genera diferencias significativas. Mediante la prueba de Tukey se observó que para  $G'$  y  $\eta^*$  la muestra a 25 y 40°C son iguales, en  $G''$  la muestra a 25 °C es similar a la de 40 °C, y esta última es similar a la de 60 °C, y en  $\text{Tan } \delta$  todas las muestras son diferentes. Del mismo modo, los resultados obtenidos para el sanky evidenciaron una influencia significativa (p-valor  $< 0.05$ ) de la temperatura (°C) sobre los módulos oscilatorios ( $G'$  y  $G''$ ), viscosidad compleja ( $\eta^*$ ) y  $\text{Tan } (\delta)$ . Por lo cual, se acepta la hipótesis alternativa ya que los valores del nivel de significación fueron menores a 0.05, es decir, la variable independiente generó variación sobre las variables dependientes (Estadísticamente diferentes).

De acuerdo con la prueba de Tukey, los valores de  $G'$  y  $G''$  a 25 y 40 °C son iguales entre sí. Así mismo, los valores de la  $\text{Tan } (\delta)$  a 40 y 60 °C son considerados iguales.

Tabla 26. Parámetros viscoelásticos en la pulpa de sanky y aguaymanto.

°C	G'(Pa)	G''(Pa)	$\eta^*$ (mPa.s)	Tan( $\delta$ )
Sanky				
25	11.64 ± 5.80E-01 <sup>a</sup>	12.56 ± 7.07E-01 <sup>a</sup>	2,702.25 ± 2.05E-01 <sup>a</sup>	1.00 ± 7.78E-06 <sup>a</sup>
40	20.59 ± 1.48E-01 <sup>a</sup>	15.05 ± 4.67E-01 <sup>a</sup>	3,997.80 ± 7.07E-01 <sup>b</sup>	0.66 ± 8.49E-02 <sup>b</sup>
60	22.22 ± 5.66E-01 <sup>b</sup>	16.21 ± 4.24E-01 <sup>b</sup>	4,383.10 ± 2.83E-01 <sup>c</sup>	0.65 ± 7.07E-02 <sup>b</sup>
p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
R <sup>2</sup>	0.98	0.89	1	0.94
Aguaymanto				
25	4.55 ± 6.57E-01 <sup>b</sup>	8.58 ± 7.07E-01 <sup>b</sup>	1.65 ± 2.07E-01 <sup>b</sup>	1.70 ± 1.34E-01 <sup>a</sup>
40	6.62 ± 5.92E-01 <sup>b</sup>	10.07 ± 4.65E-01 <sup>ab</sup>	2.00 ± 1.38E-01 <sup>b</sup>	1.33 ± 8.08E-02 <sup>b</sup>
60	11.92 ± 8.74E-01 <sup>a</sup>	11.78 ± 3.49E-01 <sup>a</sup>	2.67 ± 4.25E-02 <sup>a</sup>	0.91 ± 2.14E-02 <sup>c</sup>
p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
R <sup>2</sup>	0.97	0.92	0.94	0.96

\*Medias seguidas de letras distintas indican diferencia estadística de acuerdo a la prueba de comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ )

### **4.3. Propiedades termofísicas de las pulpas de frutas**

#### **4.3.1. Densidad**

A partir de la Ec. 38 y 39, se determinó la densidad experimental de las pulpas de sanky y aguaymanto a tres concentraciones diferentes (25, 45 y 65 °Brix) en un rango de temperatura de -20 °C (253 K) a 100 °C (373 K), las cuales fueron graficadas en la Figura 23. La densidad de ambas pulpas presentó una relación inversa a la temperatura y una dependencia de la concentración, es decir, la densidad ascendía si la concentración se incrementaba; y una reducción notable a medida que la temperatura iba aumentando. Lo cual concuerda con lo mencionado Bon et. al (2010), quienes demostraron, en su estudio sobre la pulpa de mango, que la concentración tiene un mayor efecto sobre la densidad de la pulpa en comparación con la temperatura.

Los datos experimentales fueron comparados con los datos teóricos obtenidos a partir de la Ec. 49 - 54. Cabe mencionar que las ecuaciones mencionadas fueron aplicadas a las pulpas de aguaymanto y sanky en estado “puro”; es decir sin adición de sólidos (Tabla 12). En la pulpa de sanky (Figura 23a) la densidad experimental varió en un rango desde 1067.21 hasta 1312.75 Kg /m<sup>3</sup>, de las cuales la pulpa de 25 °Brix tiene la pendiente con los valores más bajos. En el caso de la pulpa de aguaymanto (Figura 23b) los valores de la densidad variaron entre 1051.00 a 1325.62 Kg /m<sup>3</sup>, siendo la pulpa de 25°Brix la que tuvo menor densidad. La pulpa de aguaymanto tuvo mayor densidad en comparación a la pulpa de sanky. En la gráfica de la pulpa de sanky se observó una diferencia entre los datos teóricos y experimentales, esto debido a la gran diferencia de concentración entre la pulpa pura (3°Brix) y las pulpas con adición de sólidos (25, 45, y 65 °Brix). Esta diferencia no fue notoria en la pulpa de aguaymanto, ya que los valores de concentración entre la pulpa pura

(13°Brix) es cercana a la pulpa en estudio (25°Brix). Cabe mencionar que los valores de la densidad teórica obtenidos para ambos frutos se encuentran en un rango mayor al presentando por el agua en su estado más puro.

El comportamiento de la densidad de la pulpa de sanky y aguaymanto coinciden con lo informado por Ferreira et. al (2007) quienes, a través de un estudio realizado al suco de mora, demostraron que la densidad aumenta con la concentración (de 9.4 a 58 °Brix) y disminuye con la temperatura (de 0.5 °C a 80°C) en un rango de 993.0 a 1292.5 kg/m<sup>3</sup>.

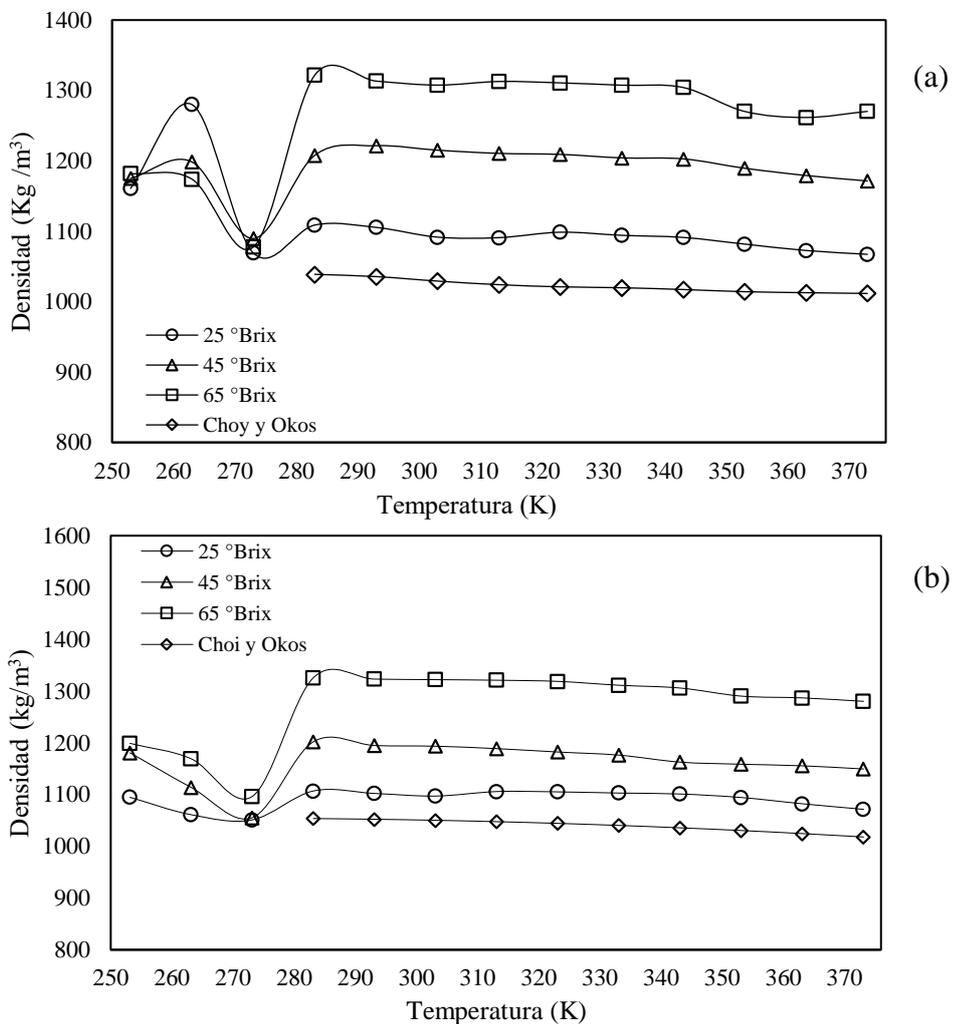


Figura 23. Comparación de la densidad experimental y teórica para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b).

### 4.3.2. Calor específico

Se calculó el calor específico a partir de los termogramas presentados en el Anexo 5 y los datos mostrados en el Anexo 6. A los datos registrados en la barrida de calentamiento del DSC se aplicó la Ec. 40 y los resultados fueron reportados en la Figura 24. El calor específico en la pulpa de sanky se encontró entre los rangos de 993.33 a 4445.18 J/kgK (Figura 24a) y en la pulpa de aguaymanto entre los rangos de 988.70 a 3847.46 J/kgK (Figura 24b). Según las figuras mencionadas, el calor específico de ambas pulpas presentaron un incremento cuando la temperatura de la pulpa aumentaba y una reducción cuando la concentración ascendía. Es importante resaltar que el calor específico del sanky fue mayor que el de la pulpa de aguaymanto. Además, resaltar un pico elevado del calor específico, que se presentó en ambas pulpas, entre 263 y 290 K. Este aumento puede ser atribuido al cambio de estado de la pulpa, ya que pasa de temperaturas bajas (263 K) a temperatura cercana al ambiente (293 K) y posterior a esas temperaturas se observó un aumento consecuente. Lo cual coincide con lo reportado por Pereira (2014) quien menciona que el calor específico de la pulpa en todas las concentraciones que se estudiaron y en el rango de temperatura de 20 a 60 °C (293.15 K a 333.15 K) mostró un comportamiento lineal.

Al igual que en la densidad, los datos experimentales fueron comparados con los datos teóricos obtenidos a partir de la Ec. 43-48 (Figura 24a y 24b). Se encontró que los datos teóricos para ambas pulpas presentaron una tendencia lineal y fue poco notorio el aumento del calor específico cuando se incrementaba la temperatura. Así mismo, se registró una diferencia cuantitativa entre los calores específicos de las pulpas “puras” y aquellas que tenían adición de sólidos.

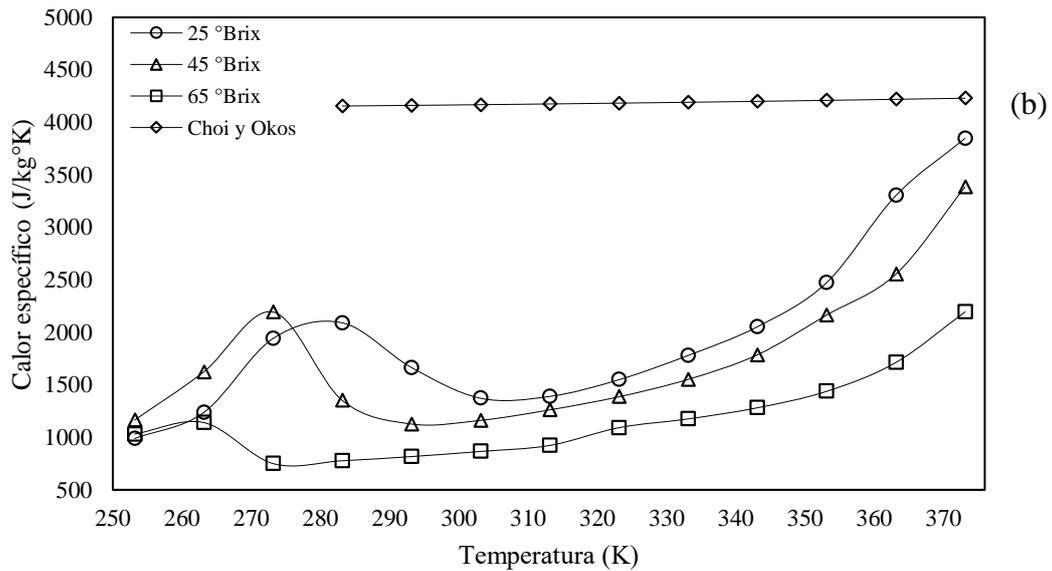
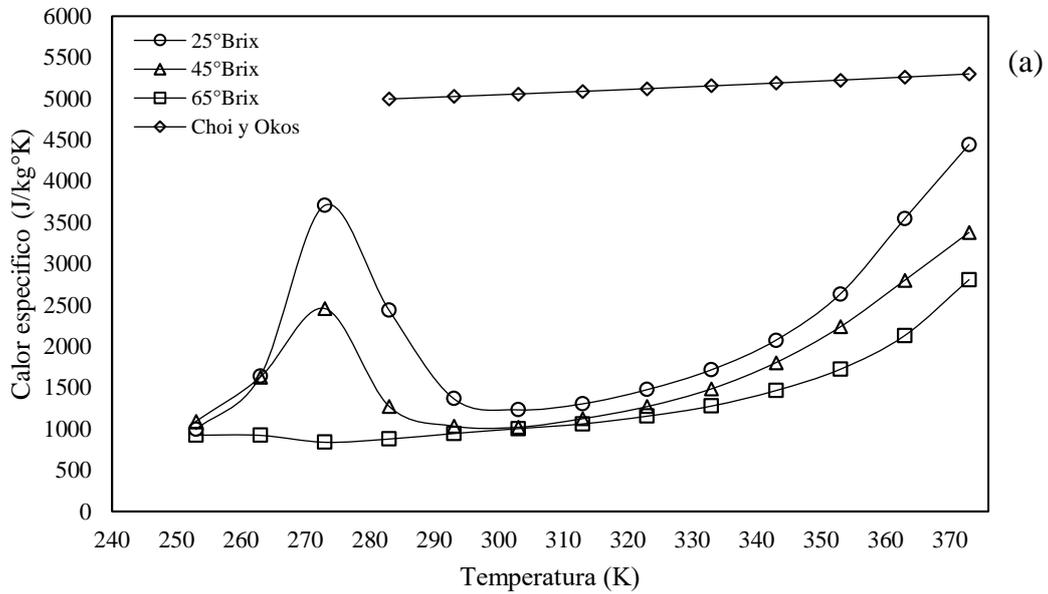


Figura 24. Comparación del calor específico experimental y teórico para la pulpa de sanky (a) y aguaymanto (b).

### 4.3.3. Conductividad térmica

La variación de la conductividad térmica experimental fue calculada a partir de la Ec. 41 y los datos teóricos de la Ec. 56 - 62. Los resultados, en función a la temperatura y concentración de las pulpas de sanky(a) y aguaymanto (b), se muestran en la Figura 25. El incremento de la temperatura y reducción de la concentración generó una alta conductividad térmica. A pesar de que el efecto de la temperatura fue menor, se apreció que la máxima conducción del calor fue a 0°C (25 y 45 °Brix) y a 273 °C (25, 45 y 65°Brix) para ambas pulpas. Los valores de la conductividad térmica de la pulpa de sanky comprendieron de 0.35 a 0.54 W/mK y los del aguaymanto de 0.43 a 0.58 W/mK, para todo el rango de temperaturas y concentraciones estudiadas. Por ende, se desprende de lo anterior que el aguaymanto condujo mejor el calor por los altos valores reportados.

Según Telis-Romero et al. (2000) y Gabas et al. (2003), indicaron que la conductividad térmica es afectada por el contenido de agua, estructura del agua y contenido azúcar en los alimentos puesto que, al incrementarse el contenido de azúcar, el agua libre disminuye. Además, Schwartzberg et al. (1981) mencionan que durante la congelación los alimentos aumentan su conductividad térmica. Los autores mencionados corroboran los resultados obtenidos para el sanky y aguaymanto. Así mismo, se observó que los valores de la conductividad térmica predichos a partir de Choi y Okos describieron adecuadamente la conducción del calor a través de la pulpa pura de sanky (5 °Brix) y aguaymanto (12 °Brix), en un rango de temperaturas comprendido entre 10 y 100 °C, ya que fueron mayores a los valores experimentales presentados por la concentración a 25 °Brix. Telis et al. (2007), reportaron para la pulpa de mango Keith (84.4% de agua y 14.2°Brix) una conductividad entre 0.554 y 0.639 (W/mK) en un rango de temperatura de 10 a 74°C (valores experimentales). Los valores mencionados anteriormente son próximos a los obtenidos para

el aguaymanto (80 % de agua y 13 °Brix), debido a que la conductividad de este fruto vario desde 0.52 a 0.59 (W/mK) en el mismo rango de temperatura (10°C a 70°C).

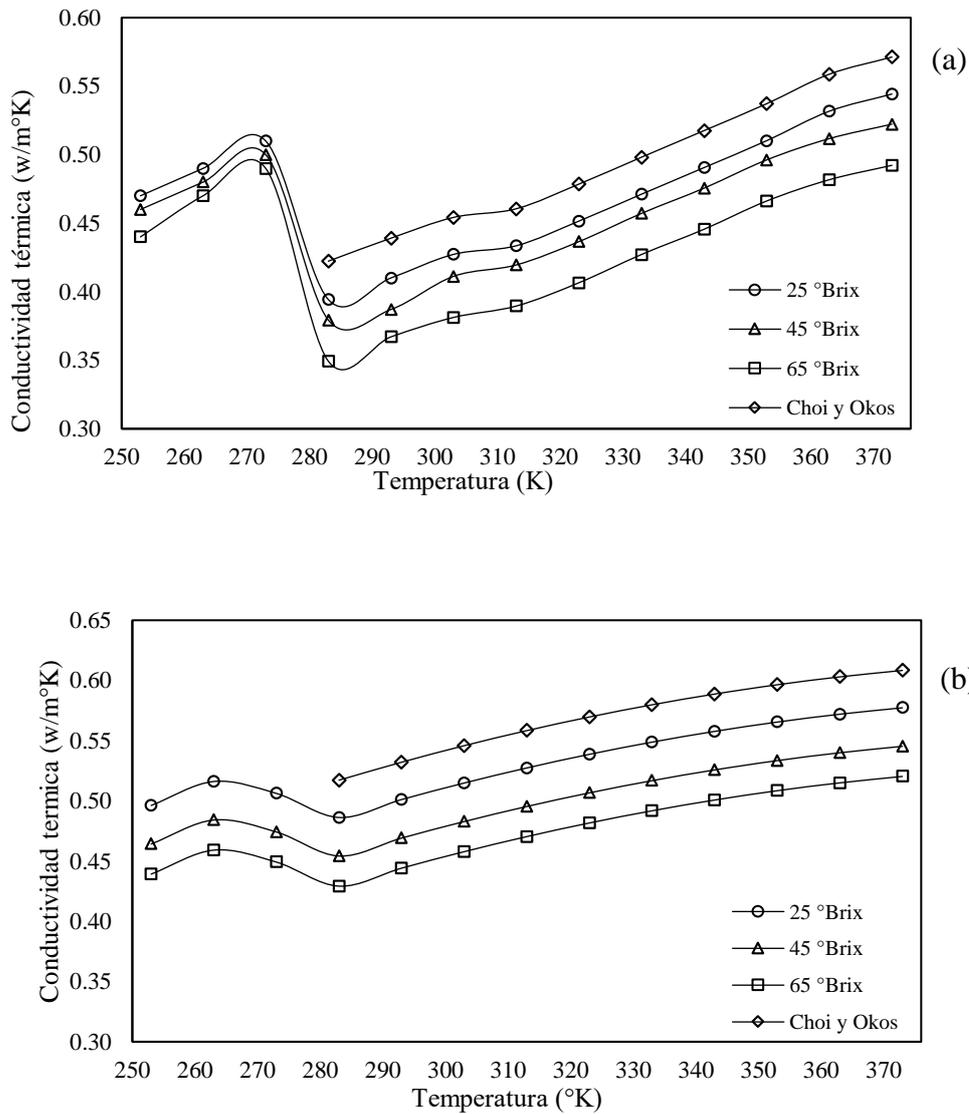


Figura 25. Conductividad térmica experimental y teórica en función a la temperatura y concentración de las pulpas de sanky(a) y aguaymanto (b).

#### 4.3.4. Difusividad térmica

La difusividad térmica experimental y teórica fueron calculadas con la Ec. 42. Los resultados, en función a la temperatura y concentración, de las pulpas de sanky y aguaymanto, se muestran en la Figura 26, a y b respectivamente. El incremento de la temperatura y disminución de la concentración generó una alta difusividad térmica. A pesar de que el efecto de la temperatura fue menor, se apreció que la máxima difusión del calor fue a 0 °C (25 y 45 °Brix) y a 273 °C (65 °Brix) para ambas pulpas. Los valores de la difusividad comprendieron desde  $0.82 \cdot 10^{-7}$  a  $1.20 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s y  $1.05 \cdot 10^{-7}$  a  $1.36 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, diferentes concentraciones (25,45 y 65 °Brix) y temperaturas (-20 a 100 °C), para el sanky y aguaymanto respectivamente. Por ende, se desprende de lo anterior que el calor se difundió más rápido a través de la pulpa de aguaymanto. Según Hubinger & Baroni (2001), al aumentar la concentración de sólidos (o se reduce el contenido de humedad), la propagación del calor o la velocidad de difusión a través de la pulpa es más lenta. Asimismo, los valores obtenidos a 25 °Brix tienen cierta similitud con los reportados para pulpas (Muniz et al., 2006; Souza et al., 2010) y alimentos en general (Singh, 1982), ya que se encuentran dentro del rango establecido ( $1.329$  a  $1.637 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s). Además, se observó que los valores de la difusividad térmica predichos a partir de Choi y Okos describen adecuadamente la difusión del calor a través de la pulpa pura de sanky y aguaymanto, en un rango de temperaturas comprendido entre 10 y 100 °C. Según Lewis (1993), esta propiedad térmica se ve afectada por la composición del alimento, siendo el agua el componente más influyente. Por ende, la mayoría de los alimentos son malos conductores del calor, aunque los alimentos con mayor contenido de humedad presentan altos valores de conductividad térmica.

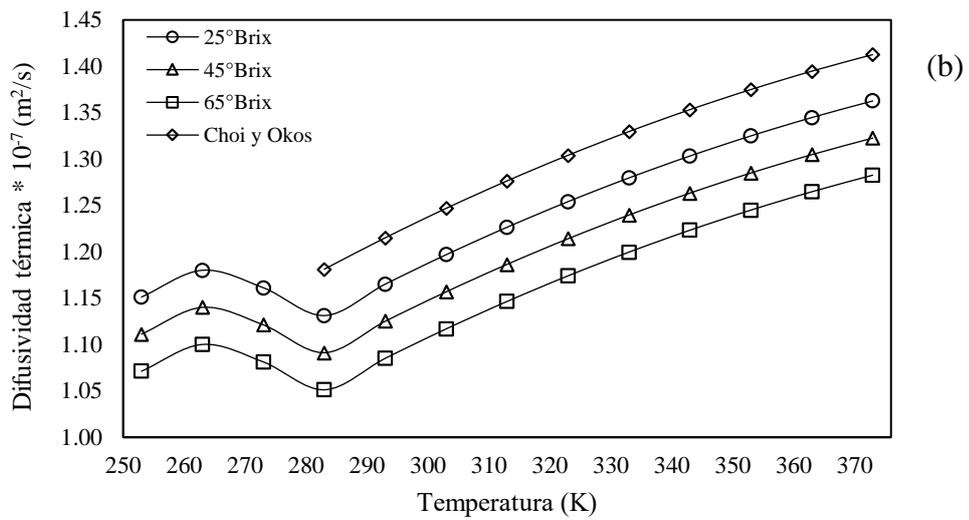
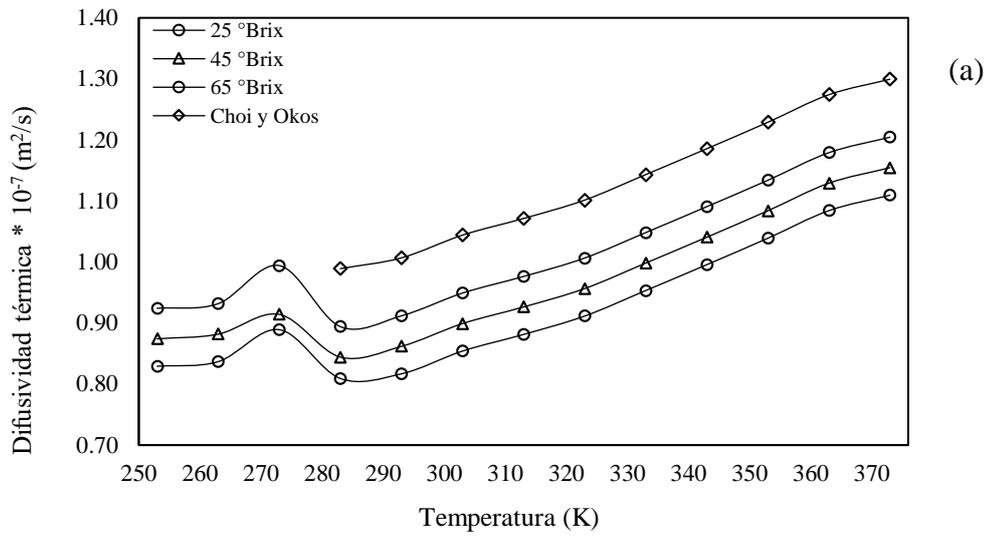


Figura 26. Difusividad térmica experimental y teórica en función a la temperatura y concentración de las pulpas de sanky (a) y aguaymanto (b).

#### **4.3.5. Análisis estadístico de las propiedades termofísicas**

Se realizó un análisis estadístico en las propiedades termofísicas de las pulpas de sanky y aguaymanto. En la Tabla 27 se presenta los resultados obtenidos para ambas pulpas, para las tres concentraciones a 20 °C. Se reportó el p-valor para cada variable independiente de la pulpa de aguaymanto, este p-valor es  $<0.05$  por lo que se demuestra que la concentración (variable independiente) genera diferencias significativas sobre las propiedades termofísicas. Con la prueba de Tukey se encontró que para  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\kappa$  y  $\alpha$  todas las muestras de pulpa de aguaymanto son diferentes una de la otra. Los resultados obtenidos para la pulpa de sanky evidenciaron una influencia significativa ( $p\text{-valor} < 0.05$ ) de la concentración (°Brix). Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa ya que los valores del nivel de significación fueron menores a 0.05, es decir, la variable independiente generó variación sobre las variables dependientes (Estadísticamente diferentes). De acuerdo con la prueba de Tukey los valores para cada uno de los parámetros son diferentes entre sí. Vajjha & Das (2012), mencionan que la conductividad térmica de un producto alimenticio depende de su composición química, la disposición física, y la temperatura del alimento. La estructura de un producto alimenticio tiene un efecto significativo en su conductividad térmica.

Tabla 27. Propiedades termofísicas de la pulpa de sanky y aguaymanto.

°Brix	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kgK)	$\kappa$ (W/mK)	$\alpha \times 10^{-7}$ (m <sup>2</sup> /s)
Sanky				
25	1,105.42 ± 1.77E-02 <sup>a</sup>	1,368.46 ± 9.19E-01 <sup>a</sup>	0.41 ± 1.12E-04 <sup>a</sup>	0.91 ± 1.19E-05 <sup>a</sup>
45	1,221.47 ± 1.41E-02 <sup>b</sup>	1,034.62 ± 1.48E+00 <sup>b</sup>	0.39 ± 1.07E-04 <sup>b</sup>	0.86 ± 1.41E-04 <sup>b</sup>
65	1,313.30 ± 7.07E-03 <sup>c</sup>	945.42 ± 2.47E+00 <sup>c</sup>	0.37 ± 0.78E-05 <sup>b</sup>	0.82 ± 1.41E-04 <sup>c</sup>
p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
R <sup>2</sup>	0.98	0.89	1	0.89
Aguaymanto				
25	1, 103.08 ± 1.45E+0 <sup>c</sup>	1, 665.79 ± 8.72E-01 <sup>a</sup>	0.50 ± 2.12E-03 <sup>a</sup>	1.17 ± 1.07E-04 <sup>a</sup>
45	1, 196.71 ± 2.97E+0 <sup>b</sup>	1, 127.54 ± 8.29E-01 <sup>b</sup>	0.47 ± 7.07E-04 <sup>b</sup>	1.13 ± 1.41E-03 <sup>b</sup>
65	1, 322.51 ± 5.66E-01 <sup>a</sup>	818.40 ± 2.17E+0 <sup>c</sup>	0.44 ± 1.07E-04 <sup>b</sup>	1.09 ± 1.12E-03 <sup>c</sup>
p-valor	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
R <sup>2</sup>	0.99	0.99	0.97	0.99

\*Medias seguidas de letras distintas indican diferencia estadística de acuerdo a la prueba de comparación de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ )

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Se determinó los parámetros reológicos y termofísicos de las pulpas de sanky y aguaymanto a diferentes concentraciones y temperaturas. Respecto al comportamiento reológico los datos experimentales se ajustaron al modelo de la ley de la potencia u Ostwald de Waele, para el sanky el valor de  $n$  (índice de flujo) se encontró entre 0.508 y 0.785, para  $k$  (índice de consistencia) entre 0.114 y 0.899 (Pa.s<sup>n</sup>) y para el aguaymanto  $n$  entre 0.816 y 0.947 y  $k$  entre 0.003 y 0.243 (Pa.s<sup>n</sup>). La pulpa de sanky y aguaymanto poseen una naturaleza no newtoniana – pseudoplástica.

Los ensayos viscoelásticos mostraron un comportamiento semi-sólido y semi-liquido manifestado por el sanky y aguaymanto, respectivamente. La variación de la temperatura repercute sobre los módulos oscilatorios ( $G'$  y  $G''$ ), viscosidad compleja ( $n^*$ ) y  $\tan(\delta)$ .

Por otro lado, se obtuvieron los siguientes valores para las propiedades termofísicas, para el sanky el calor específico varió entre 993.33 a 4445.18 J/kgK, la conductividad térmica entre 0.35 a 0.54 W/mK y difusividad térmica entre  $0.81 \cdot 10^{-7}$  a  $1.20 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. Así mismo, para el aguaymanto se obtuvo valores del calor específico entre 988.70 a 3847.46 J/kgK; para la conductividad térmica entre 0.43 a 0.58 W/mK y difusividad térmica entre  $1.05 \cdot 10^{-7}$  a  $1.36 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

Los resultados obtenidos pueden ser usados en diseño de equipos y procesos dentro de la industria alimentaria, con el fin de incentivar el empleo de estos frutos andinos en el desarrollo de nuevos productos.

## REFERENCIAS

- A. O. A. C. (1990). Official methods of analysis. Vol. II.
- AACC American Association for Clinical Chemistry. (1999a). Ash-Basic Method. AACC International Approved Methods. <http://doi.org/10.1094/AACCIntMethod-08-01.01>
- Alexandre, D. (2002). Conservação da polpa de açaí através da tecnologia de obstáculos e caracterização reológica.
- Alvis, A.; Cortés, L. & Páez, M. (2009). Transferencia de calor y materia durante la fritura de trozos de ñame (*Dioscorea alata*). Información Tecnológica 20(1): 99-109.
- Andrade, R.; Torre, R.; Montes, J.; Perez, O.; Restan, E. & Peña, R. (2009). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.).
- Arévalo, A., García, J., Armas, V., Rodríguez, J., Iparraguirre, R., Bartolo, L., & Rodríguez, P. (2012). Uso de biopectinasa y filtración al vacío para la clarificación de una mezcla diluida de pulpa de Sancayo (*Corryocactus brevistylus*) y tuna (*Opuntia ficus-indica*) a diferentes temperaturas. Agroindustrial Science, 2(1), 84-90.
- Augusto, P. E., Cristianini, M., & Ibarz, A. (2012). Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp. Journal of Food Engineering, 108(2), 283-289.

- Barbosa-Cánovas, G.; Ibarz, A. & Peleg, M. (1993). Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión. *Alimentaria*. 241, 39-89.
- Barbosa-Canovas, G.; Palou, E.; Pothakamury, U. & Swanson, B. (1999). Conservación no Térmica de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza-España.
- Bhandari, P. N., R. S. Singhal & D. D. Kale. (2002). “Effect of succinylation on the rheological profile of starch pastes”. *Carbohydrate Polymers* 47:365–371.
- Bon, J.; Váquiro, H.; Benedito, J. & Romero, T. (2010). Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera Indica* L. cv. Tommy Atkins). Artículo. University of Valencia.
- Bourne, M. (1982). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*.
- Branco, I. & Gasparetto, C. (2003). Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo do efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 23(1), 166-171.
- Britton N. L. & Rose J. N. (1920). “Cactaceae 2: 1–241”. The Carnegie Institution of Washington. Washington, D.C.
- Bustamante, R.; Oblitas, J. & Rojas, E. (2016). Influence of temperature and concentration on the rheological behavior of concentrated aguaymanto pulp (*Physalis peruviana* L.) Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ciencias Agraria. Cajamarca, Perú.

- Cáceres F., García A., Ponce E. & Andrade R. (2000). “El Sancayo”. *Corryocactus brevistylus* (*Schumann ex vaupel*) Britton y Rose. *Revista Quepo* (14): 24-27.
- Cárcamo, A. (2005). Comportamiento reológico de pasta de murta (*Ugni molinae* Turcz) en estado Fresco y Congelado.
- Carpio Apaza, R. E., & Figueroa Huayllapuma, T. (2017). Efecto de la adición de goma arábica y maltodextrina en el contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante en extracto de sancayo (*Corryocactus brevistylus*) liofilizado. Céspedes S. & Cary A., (1998). Liofilización, determinación del contenido de vitamina C y yodo e índice de consumo de dos variedades de sanky (*Corryocactus brevistylus* y *puquiensis*). Tesis para optar el título profesional de Licenciada en Nutrición Humana UNAS. (Arequipa-Perú)
- Castro, A.; Rodríguez, L. & Vargas, E. (2007). Secado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) por aire caliente con pre-tratamiento de osmodeshidratación. Universidad de Bogotá, Programa de Ingeniería de Alimentos. Bogotá, Colombia.
- Chamorro, R. A. M., Guzmán, J. P., & Rengifo, L. G. (2015). Determinación de la Capacidad Antioxidante de los Compuestos Fenólicos del Sancayo (*Corryocactus brevistylus*). *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1).
- Chin, N.; Chan, S.; Tusof, Y.; Chuah, T. & Talib, R. (2009). Modelling of rheological behavior of pummelo juice concentrates using master-curve. *Jural of food engerieening*.

- Choi, Y. & Okos, M. (1986). Efecto de temperatura y composición en las propiedades termales de los alimentos En: Le Maguer, M, 1986. Ingeniería de alimentos y Aplicaciones de Proceso. Elsevier Editor de la Ciencia Aplicado. Londres. 613p.
- Chun, S. Y., & Yoo, B. (2004). Rheological behavior of cooked rice flour dispersions in steady and dynamic shear. *Journal of food engineering*, 65(3), 363-370.
- Coello, V. & Garcés, C. (2012). Análisis de propiedades térmicas durante gelatinización en tres variedades de arroz INIAP aplicando el calorímetro diferencial de barrido (DSC). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil, Ecuador.
- Cortés, R. & Montoya, C. (2010). Frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo “colombia” mínimamente procesados, adicionados con microorganismos probióticos utilizando la Ingeniería de Matrices. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- Costa, L.T. (2006). Características físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.
- Costell, E.; Clemente, G. & 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. Tecnol. Aliment.* 4, 539-550.
- Dantas, E.; Melo, A. & Feitosa, R. (2007). Determinação da difusividade térmica da polpa de manga espada.

- Ditchfield, C., Tadini, C. C., Singh, R., & Toledo, R. T. (2004). Rheological properties of banana purée at high temperatures. *International Journal of Food Properties*, 7, 571–584.
- Encina, C. (2010). Influencia del descerado y composición del almíbar en la optimización del tratamiento térmico de la conserva de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) para la mayor retención del ácido ascórbico. Perú. ISBN: 978-612-4011-24-5.
- Evangelista Guía, W., Manco, R., & Romario, J. (2015). Efecto de los edulcorantes (sucralosa y stevia) sobre las características sensoriales de una bebida a base de sanky (*Corryocactus brevistylus*).
- Fennema, O.; Karel, M. & Lund, D. (1981). *Principles of Food Science. Vol II. Physical of Food Preservation*. Marcel Dekker, inc. N.Y. 474p.
- Fischer, G. (2000). Producción, post-cosecha y exportación de la Uchuva. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Colombia.
- Fizman, S.M.; Costell, E. & 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.
- García, M.; Guzmán, S.; Andrade, E. & Hernández, D. (2010). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales del jugo obtenido mediante tratamiento enzimático en zarzamora comercial (*Rubus spp*) del estado de Michoacán. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

- Gerhard, F.; Almanza, P. & Miranda, D. (2014). Importancia y cultivo de la Uchuva (*Physalis peruviana* L.). Artículo. Brasil.
- Giraldo, G.; Gabas, A.; Telis, V. & Telis, J. (2010). Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. Departamento de Física e Química, Universidad Nacional de Colômbia – UNAL, Manizales – A.A, 127, Colombia.
- Gokdogan, O.; Tanzer, E. & Murat, Y. (2015). Thermophysical properties of castor oil (*Ricinus communis* L.) Biodiesel and its blends. Department of Biosystems Engineering, Nevsehir Haci Bektas University, Nevsehir, Turkey
- Gómez, L. (2009). Determinación de la fracción de agua no congelada en murta (*Ugni molinae* Turcz) mediante termo-análisis con el calorímetro diferencial de barrido. Chile.
- Granados, Y. (2015). Importancia de los ensayos TGS y DSC en el estudio de las propiedades térmicas de mezclas asfálticas. Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Facultad Del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ingeniería En Topografía. Bogotá D.C.
- Guerra, A; Cano, N; Pinto, P; & Vílchez, M. (2010). Determinación de la difusividad térmica. Universidad Nacional Agraria la Molina. Facultad: Industrias Alimentarias.
- Guevara, A. & Málaga, R. (2013). Determinación de los parámetros de proceso y caracterización del puré de aguaymanto. Universidad Nacional Agraria La Molina. ISSN: 1025-9929. Lima, Perú.

- Haminiuk, C. (2005). Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de araçá (*Psidium cattleianum* sabine) e amora-preta (*Rubus spp*). 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) -Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Haminiuk, C.; Sierakowski, M.; Vidal, J. & Masson, M. (2005). Influence of temperature on the rheological behavior of whole araçá Pulp (*Psidium cattleianum* sabine). Food Engineering Department. Curitiba, Brasil.
- Harnanan, S.; Tejinder, S. & Bains, G. (2001). Effect of processing, preservation and storage on rheology of guava pulp. J. Texture Studies 32, 271–284.
- Harper, J. & Lebermann, K. (1962). Rheological behaviour of pear purees. Proc.1st Int. Congress Food Sci. Technol. 1, 719-728.
- Harper, J. C. & Elsahrigi A. F. (1965). Viscometric behavior of tomato concentrates. J. Food Sci. 30:470-476.
- Hoffmann A. & Walter, H. (2004). “Cactáceas en la flora silvestre de Chile”. Segunda edición. Ediciones Fundación Claudio Gay. Santiago, Chile.
- Holdsworth, S. (1971). Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid foods products. J. Texture Stud. 2, 393-418.
- Hubinger, M., Baroni, A., Alvarado, J., & Aguilera, J. (2001). Propiedades térmicas: conductividad y difusividad térmica. Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. Zaragoza: Acribia, 213-236.

- Iagher, F., Reicher, F., & Ganter, J. L. M. S. (2002). Structural and rheological properties of polysaccharides from mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31(1-3), 9-17.
- Ibarz, A. & Barbosa-Cánovas, G. (1999). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania. USA. pp. 85-204.
- Ibarz, A. & Casero, T. (1987). Reología de zumos de manzana de diferente variedad. *Alimentaria*, 185:57-59
- Ibarz, A. & Pagan, J. (1987). Rheology of raspberry juices. *Journal Food Engineering*, 6:269-289.
- Ibarz, A.; Giner, J.; Pagan, J, Gimeno, V. & Garza, S. (1995). Rheological behavior of kiwi fruit juice concentrates. *Journal Texture Studies*, 26:137- 145.
- Ibarz, A.; González, C.; Esplugas, S.; Vicente, M. (1992). Rheology of clarified fruit juices. I: Peach juices. *Journal Food Engineering*, 15:49-61.
- Juszczak, L. & Fortuna, T. (2003). Effect of temperatura and soluble solid contenido n the viscosity of cherry juice concéntrate. University of Agriculture, Department of Analysis and Evaluation of food quality. Cracow, Poland.
- Kodre, K.; Attarde, S.; Yendhe, P.; Patll, R. & Barge V. (2014). Differential Scanning Calorimetry: A Review. PDEA's Shankarrao Ursal College of Pharmaceutical Sciences and Research Centre, Kharadi, Pune - 411014, Maharashtra, India. E-ISSN: 2321-0812

- Krokida, M.; Maroulis, Z. & Saravacos, G. (2001). Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data. *International Journal of Food Properties* 4 (2), 179–200.
- Lasanta, I. (2013). Estudio de adiciones de bismuto en aleaciones zinc-aluminio. Departamento de ciencia de materiales e ingeniería metalúrgica, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Lauro M; Poutanen, K. & Forsell, P. (2000) Effect of partial gelatinization and lipid addition on  $\alpha$ -amylolysis of barley starch granules. *Cereal Chem.* 77:595-601.
- Lewis, M. (1993). *Propiedades de Los Alimentos y de Los Sistemas de Procesado*. Zaragoza: Acribia. 494 p
- Lopes, A.; Mattietto, R., Menezes, H.; Silva, L. & Pena R. (2013). Rheological behavior of brazilian cherry (*Eugenia uniflora* L.). Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Instituto de Tecnología. Brasil.
- Machado, K. & Vélez, J. (2008). Study of physical properties in mexican foods during freezing and frozen storage. Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, Universidad de las Américas. México.
- Málaga, C. & Rodríguez, M. (2014). Proceso para la obtención de un néctar Funcional a partir de Sanky (*Corryocactus Brevistylus*) maracuyá (*Passiflora Edulis*), y agua mineral procedente de Yura. Marín, A.

- Márquez, C.; Trillos, G. Cartagena, V. & Cotes, T. (2009). Evaluación fisicoquímica y sensorial de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. ISSN: 0121-4004.
- Martins, M. (2009). Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas de polpa de manga ubá. Minas Gerais, Brasil.
- Mattos, C & Gaspar, A. (2002). Introducing Specific Heat Through Cooling Curves. Departamento de Física e Química, Universidade Estadual Paulista. São Paulo, Brasil.
- Mendoza, J.; Rodriguez, A. & Millán, P. (2012). Caracterización fisicoquímica de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en la región de Silvia Cauca. Biotecnología en el sector Agropecuario. Colombia.
- Miranda, W. & Arthur, A. (2012). Principios matemáticos del proceso térmico de alimentos. España. ISBN: 978-84-96709-86-7.
- Mizrahi, S. & Berk, Z. (1972). Flow behaviour of concentrated orange juice: mathematical treatment. *Journal of Texture Studies*, 3(1), 69-79.
- Mostacero, J., & Mejía, F. (2002). Taxonomía de las Fanerógamas útiles en el Perú. Editora Normas Legales SAC Trujillo-Perú.
- Müller, H. (1973). Introducción a la reología de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España.

- Muniz, M. B.; Queiroz, A. J. M.; Figueiredo, R. M. F; Duarte, M. E. M. (2006). Caracterização termofísica de polpas de bacuri. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 26, n. 2, p. 360-368,
- Navarro, L. (2015). Estudio de pre-factibilidad para la instalación de una planta industrial de envasado de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) fresco, en Ayacucho. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho, Perú.
- Navas, J. (2006). Introducción a la reología de los alimentos.
- Nicoletti, J.; Pereira, E.; Turbiani, F. & Stroher, G. (2013). Thermophysical properties of white chicken meat: effect of temperature and moisture content. Universidad Tecnológica Federal do Paraná.
- Nindo, C.; Tang, J.; Powers, J.; & Singh, P. (2005). Viscosity of blueberry and raspberry juices for processing applications. *Journal of Food Engineering*, 69, 343–350.
- Nolazco, D. & Guevara, A. (2009). Estudio de las principales características fisicoquímicas y comportamiento del Sanqui (*Corryocactus brevistylus* subsp. puquiensis (Rauh & Backeberg) en almacenamiento. In *Anales Científicos* (Vol. 70, No. 4, pp. 1-11).
- Ocampo, R.; Zapateiro, L.; Gómez, J. & Torres, C. (2012). Caracterización bromatológica, fisicoquímica microbiológica y reológica de la pulpa de borojó (*Borojoa Patinoi* Cuatrec). *Revista Ciencia y Tecnología*, 5(1), 17-24.

- Ochoa, O.; Amézquita, A. & Chejne, F. (2005). Thermophysical properties of meat- A review. Department of Biological Systems Engineering. University of Nebraska-Lincoln, Nebraska. USA.
- Odigboh, E.; & Mohsenin, N. (1975). Effects of concentration on the viscosity profile of cassava starch pastes during the cooking-cooling process. *Journal of Texture Studies*, 5(4), 441-457.
- Ortega, F.; Salcedo, E.; Arrieta, R. & Torres, R. (2015). Effect of temperature and concentration on rheological properties of mango pulp variety Tommy Atkins. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Montería, Colombia.
- Osorio, D. & Roldan, J. (2003). *Volvamos al campo: manual de la uchuva*. Bogotá. Grupo Latino. Colombia.
- Ostolaza, C. (2011). "101 Cactus del Perú". Edición Ministerio del Ambiente. Pag. 96. 253. Perú.
- Pauro, V. (2016). Aplicación de dos métodos (encerrado o inmersión en cloruro de calcio) para la conservación post-cosecha del aguaymanto (*Physalis peruviana*) sin cáliz). Universidad Nacional del Antiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Ingeniería Agroindustrial. Tesis de Grado. Puno, Perú.
- Pereira, E.; Brandão, E.; Borges, S.; & Maia, M. (2008). Influence of concentration on the steady and oscillatory shear behavior of umbu pulp. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(1), 87-90.

- Perry, R. & Chilton, C. (1982). Manual del ingeniero químico. 2ª Edición. McGraw-Hill. México.
- Possa, M. & Lima, J. (2000). Comportamiento reológico de polpas de minériido. CETEM/MCT. Rio de Janeiro.
- Quintana, S.; Granado, C. & García, L. (2016). Propiedades Reológicas de la pulpa de papaya (*Carica papaya*). Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería. Cartagena de Indias, Colombia.
- Ramadán, M. & Mörsel, J. (2003). Oil Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). Journal of Agricultural and Food Chem; 51: 969-74.
- Ramos, A. M., & Ibarz, A. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. Food Science and Technology (Campinas), 26(1), 214-219.
- Ramos, L. (2010). El aguaymanto cultivo promisorio de la región Cajamarca. Proyecto de desarrollo rural sostenible de Cajamarca. Cajamarca (Perú).
- Rao M. (1977). Measurement of flow properties of fluid foods. Developments, limitations, and interpretation of phenomena. J. Texture Stud. 8, 257-282.
- Rao, M. & Rizvi, S. (1986). Engineering properties of foods. Ed. Marcel Dekker, inc., New York.
- Rao, M. (1975). Measurements of flow properties of food suspensions with a mixer. J. Texture Stud. 6, 533-539.

- Rao, M. (1977a). Rheology of liquid foods. A review. *J. Texture Stud.* 8, 135-168.
- Rao, M. (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. (1999). Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications. New York: Aspen Publishers.
- Rao, M.; Bourne, M. & Cooley, H. (1981). Flow properties of tomato concentrates. *J. Texture Stud.* 12, 521-528.
- Rao, M.; Cooley, H. & Vitali, A. (1984). Flow properties of concentrated juices at low temperatures. *Food Technol.* 38, 113-119.
- Repo de Carrasco, R. & Zelada, C. (2008). Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. ISSN: 1810-634X
- Restrepo, A.; Cortés, R. & Márquez, C. (2009). Uchuvas (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. ISSN: 0121-4004.
- Rha, Ch. (1978). Rheology of fluid foods. *Food Technol.* 32(7): 77-82. 75.
- Rojas, A. (2013). Fondo de protección ambiental. Ministerio de medio ambiente. Gobierno de Chile.
- Sahin, S. & Gülüm, S. (2009). Propiedades físicas de los alimentos. España. Editorial ACRIBA: ISBN: 978-84-200-1126-4

- Sanchez, C., Blanco, D., Oria, R., & Sanchez-Gimeno, A. C. (2009). White guava fruit and purees: textural and rheological properties and effect of the temperature. *Journal of texture studies*, 40(3), 334-345.
- Saravacos, G. (1970). Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. *J. Food Sci.* 35, 122-125.
- Sato, A. & Cunha, R. (2007). Influence of temperature on the rheological behavior of jaboticaba pulp. *Food Science and Technology (Campinas)*, 27(4), 890-896.
- Sato, A. C. K. (2005). Influência do tamanho de partículas no comportamento reológico da polpa de jaboticaba.
- Scaldo, A.; Cickerson J.; Peeler, J. & Read J. (1970). The Viscosity Of Egg And Egg Products. *Food Technol.* 24, 1301-1307.
- Schwartz, M. & Costell, E. (1989). Influencia de la temperatura y de la concentración en la viscosidad de los zumos de manzana y de uva. *Rev. Agroquim. Technol. Aliment.* 2, 239-245.
- Schwartzberg, H.G. 1981. In *Mathematical Analysis of the Freezing and Thawing of Foods*, AICHE Summer Meeting, Detroit, MI, August, 1–33
- Silva, R.; Pollio M.; Márquez, A. & Della P. (2013). “Comportamiento viscoelástico de pulpa de kiwi”. XIV Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, CYTAL, 23, 24 y 25 de octubre de 2013, Rosario, Santa Fé, Argentina.

- Silva, R.; Pollio, M.; Márquez, A. & Della, P. (2014). Propiedades reológicas de la pulpa de kiwi (*Actinidia chinensis*): comportamiento de Flujo. Universidad Peruana Unión. Perú.
- Silva, F., Guimaraes, D. & Gasparetto, C. (2005). Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. Cienc. Tecnol. Alimentos, Campinas.
- Singh, P. & Heldman, D. (1998). Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza. España. 544p.
- Singh, R. (1982). Thermal diffusivity in food processing. Food Technology, p. 87-91,
- Steffe, J. (1996). Rheological Methods In Food Process Engineering, 2nd Ed. Freeman Press, East Lansing, Michigan State, Usa. 418 P.
- Strahler A. N. (1992). “Geología Física”. Editorial Omega. Barcelona. España.
- Sugai, A. (2002). Processamento descontínuo de purê de manga (*Mangifera indica* Linn), Variedade Haden: Estudo da viabilidade do produto para pronto consumo. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- Tacanga, W. (2015). Características y propiedades funcionales de *Physalis peruviana* “Aguaymanto”. Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Ingeniería Agroindustrial. Trujillo, Perú.
- Telis, V. R. N., Telis-Romero, J., Sobral, P. J. A., & Gabas, A. L. (2007). Freezing point and thermal conductivity of tropical fruit pulps: mango and papaya. International Journal of Food Properties, 10(1), 73-84.

- Tirado, D.; Acevedo, D. & Montero, P. (2014). Rheological properties of sweetened tamarind pulp. Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Alimentos. Bolivar, Colombia.
- Togrul, H. & Arslan, N. (2003). Mathematical model prediction of apparent viscosity of molasses. Furat University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering. Elazig, Turkey.
- Tonon, R.; Alexandre, D.; Hubinger, M. & Cunha, R. (2009). Steady and dynamic shear rheological properties of açai pulp (*Euterpe oleraceae* Mart.). Journal of Food Engineering, 92(4), 425-431.
- Tovar, E. (2010). Evaluación de las propiedades reológicas de pulpas de frutas y productos derivados en una planta procesadora de jugos. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Barcelona.
- Tscheuschner, H. D. (2001). Fundamentos de tecnología de los alimentos. Acribia,.
- Vidal, J.; Pelegri, D. & Gasparetto, C. (2004) Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Mangifera indica* L-Keitt). Revista Ciencia y Tecnología de Alimentos, 24(1):39-42.
- Vitali, A & Rao, M. (1984). Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. Journal of Food Science, 49:882-888.
- Vitali, A. & Rao, M. (1982). Flow behaviour of guava puree as a function of temperature and concentration. Journal of Texture Studies, 13: 275-289.
- Wills, R.; Lee, H.; McGlasson, B. y Graham, D. (1997). Fisiología y manipulación de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. Acribia, Zaragoza, p143-146.



## ANEXOS

### Anexo 1. Proceso para la obtención de pulpa de frutos andinos



Figura 27. Acondicionamiento del sanky para la obtención de la pulpa libre de pepas y otros residuos.



Figura 28. Acondicionamiento del aguaymanto para la obtención de la pulpa libre de pepas y otros residuos.

Anexo 2. Acondicionamiento de pulpa para el estudio



Figura 29. Pulpa de sanky.



Figura 30. Pulpa de aguaymanto.



Figura 31. Azúcar usado para regular la concentración de las pulpas en los diferentes tratamientos.



Figura 32. Distribución de pulpa de aguaymanto en bolsas de polietileno, 50 ml en cada una.

Anexo 3. Instrumento para el estudio de los parámetros reológicos.



Figura 33. Reómetro rotacional empleado en el análisis de los parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.



Figura 34. Usillo cilindro concéntrico usado para el estudio de los parámetros reológicos de la pulpa de sanky y aguaymanto.



Figura 35. Adición de la muestra de pulpa de sanky en el cilindro del reómetro.

Anexo 4. Reogramas de las pulpas de frutas.

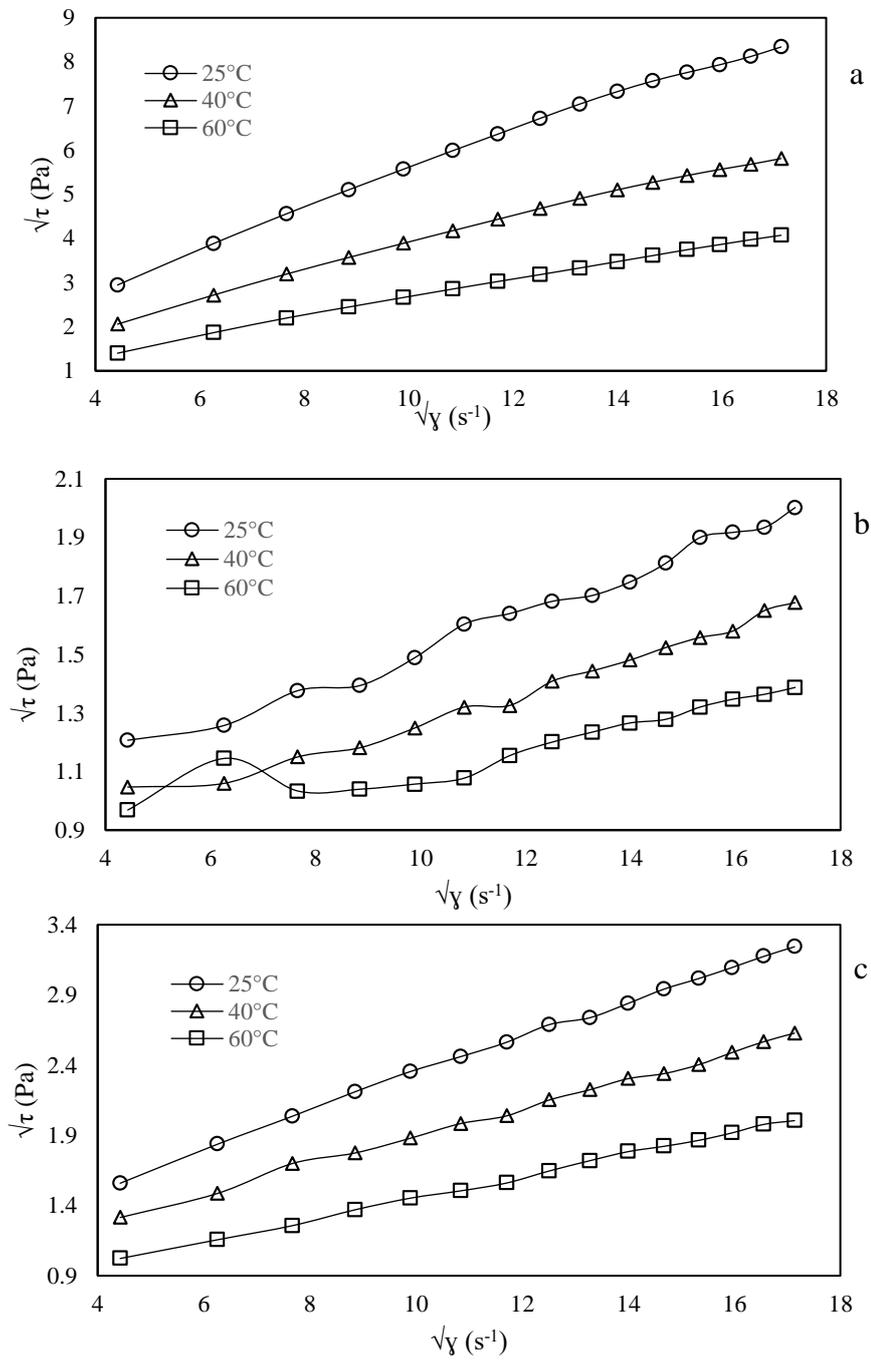


Figura 36. Reogramas del modelo Casson para la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.

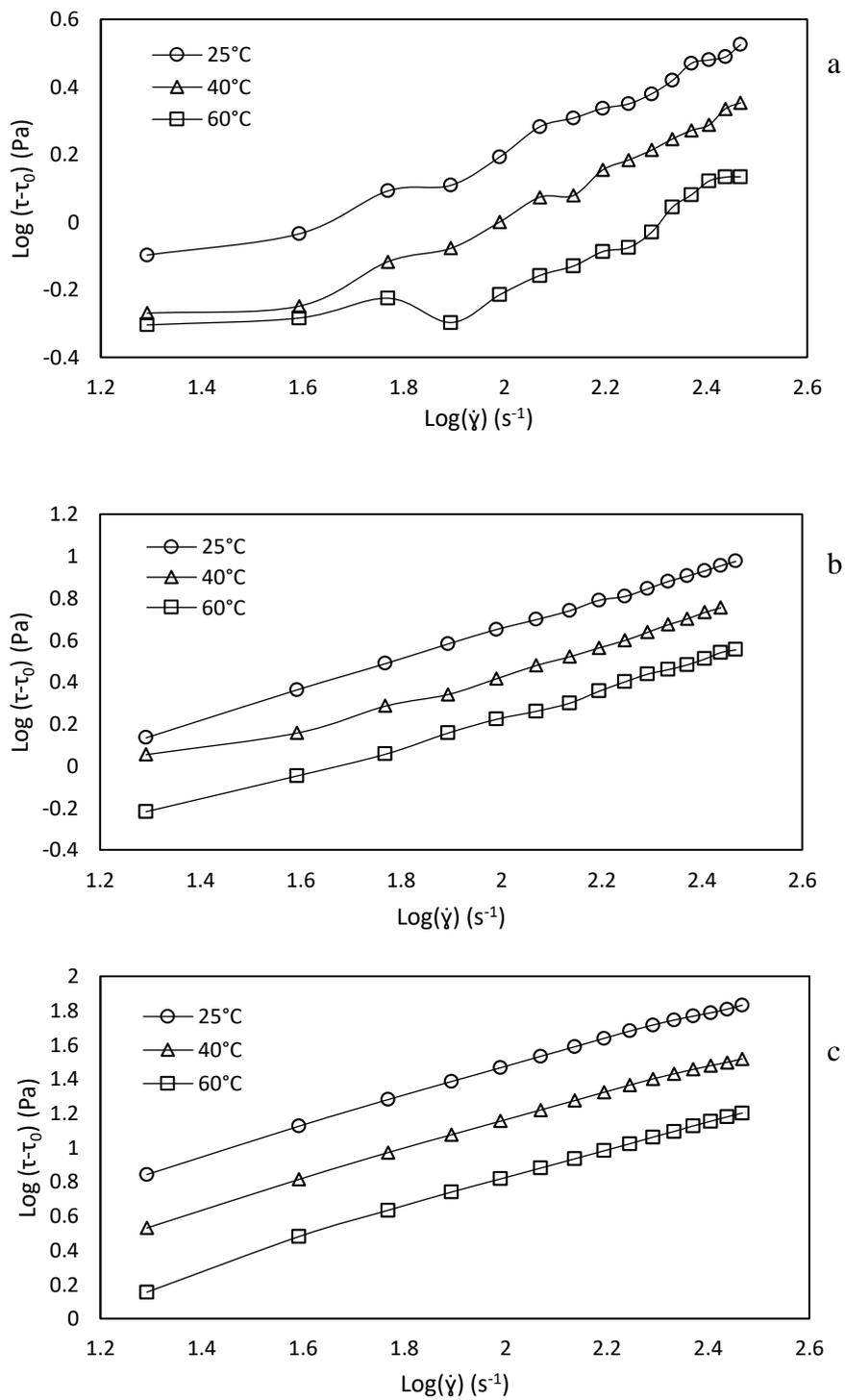


Figura 37. Reogramas del modelo Hershel-Bulkley para la pulpa de sanky a 25 (a), 45 (b) y 65 °Brix(c) a diferentes temperaturas.

## Anexo 5. Termogramas de las pulpas de frutas.

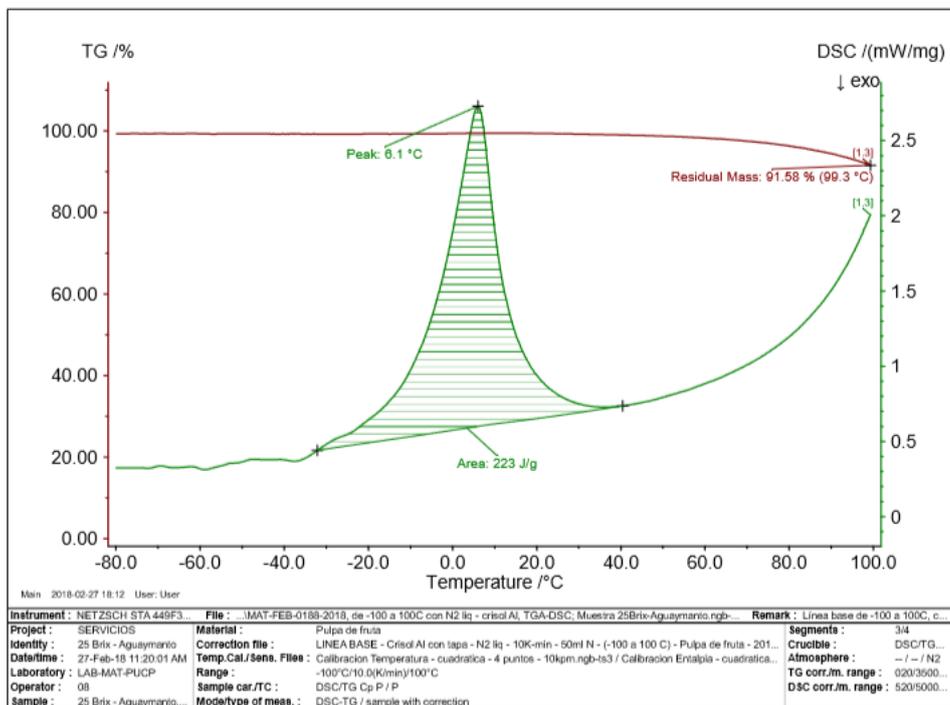


Figura 38. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 25°Brix.

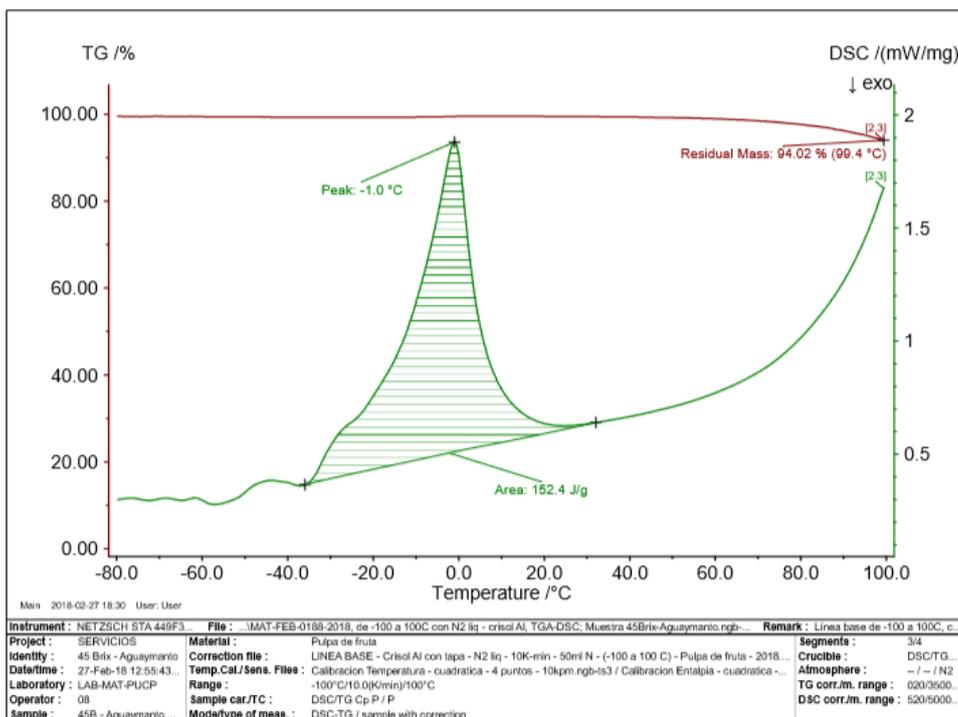


Figura 39. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 45 °Brix.

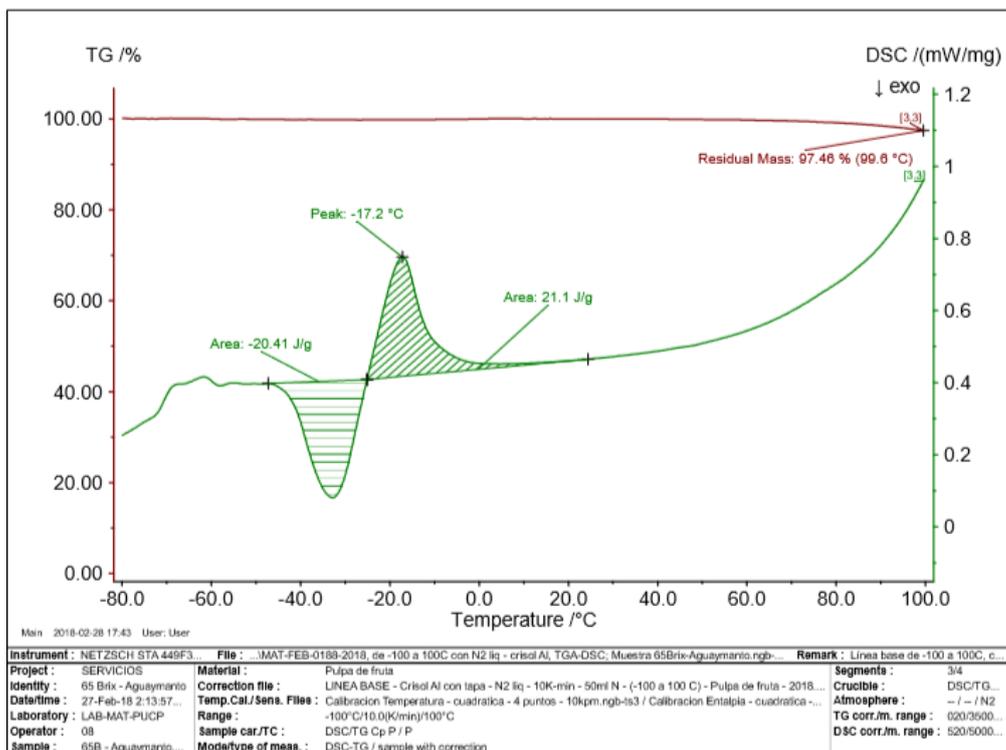


Figura 40. Termograma de la pulpa de aguaymanto a 65 °Brix.

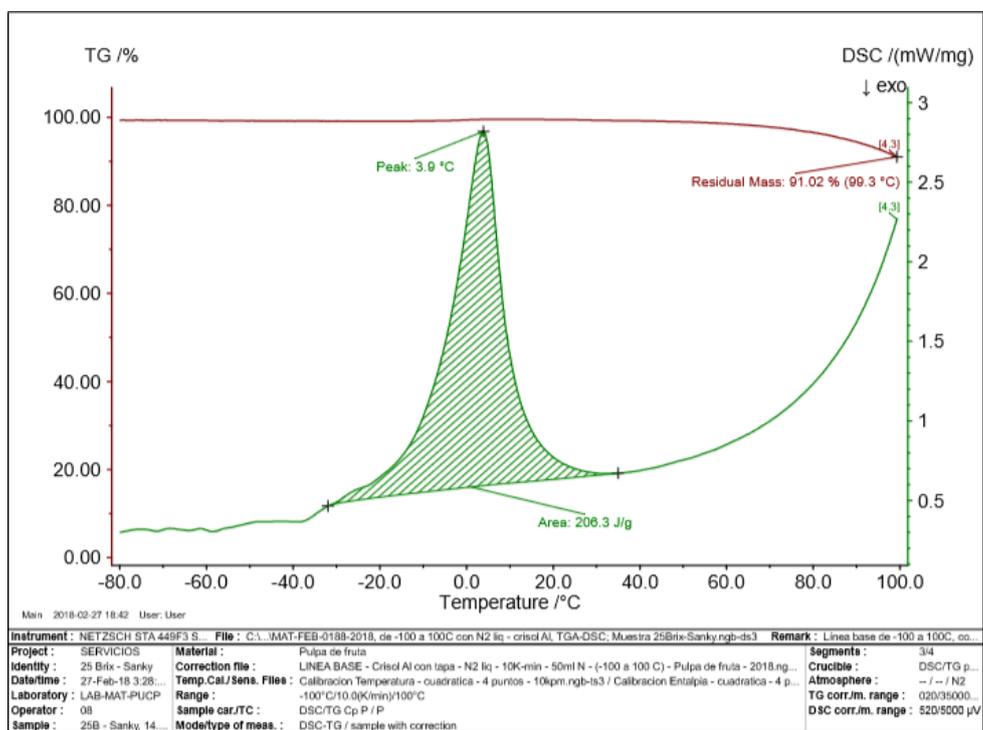


Figura 41. Termograma de la pulpa de sanky a 25 °Brix.

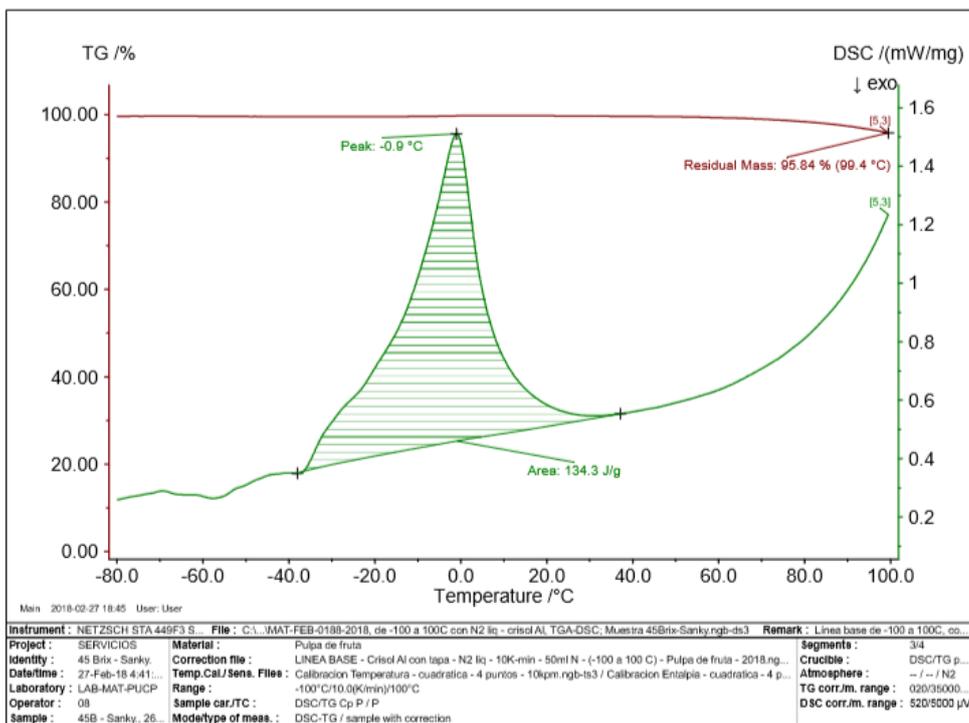


Figura 42. Termograma de la pulpa de sanky a 45 °Brix.

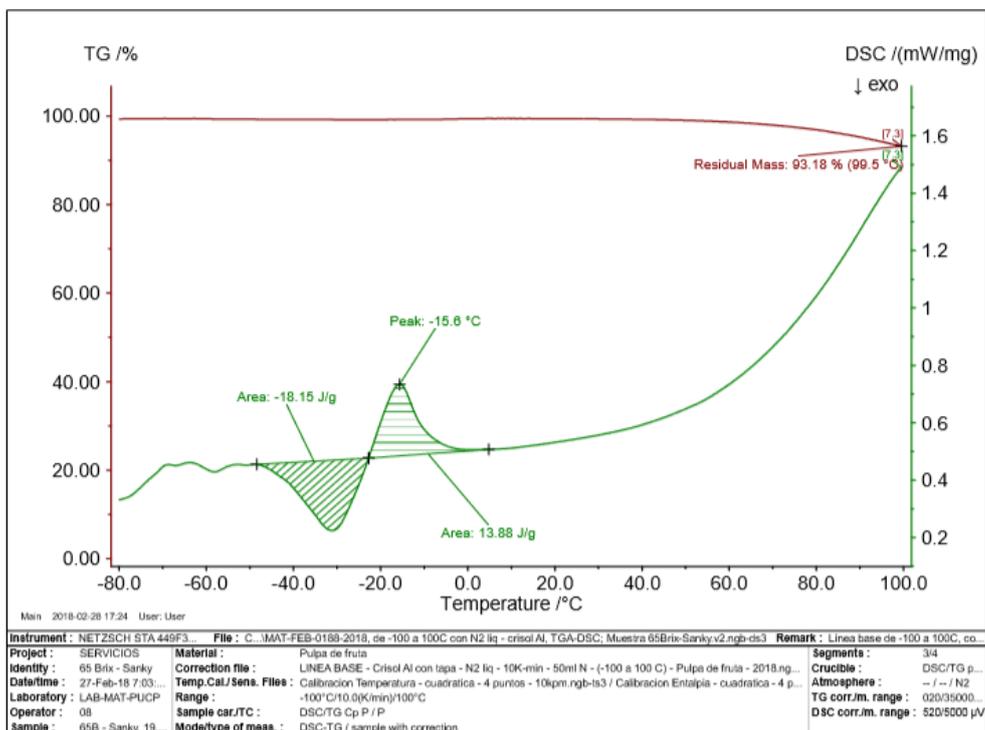


Figura 43. Termograma de la pulpa de sanky a 65 °Brix.

Anexo 6. Datos registrados en el DSC.

Tabla 28. Datos obtenidos en el DSC para la pulpa de sanky

<b>Concentración (°Brix)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>DSC (mW/mg)</b>
25	-20	25.61	0.0065
	-10	26.61	0.0103
	0	27.63	0.0224
	10	28.62	0.0142
	20	29.51	0.0077
	30	30.51	0.0067
	40	31.54	0.0069
	50	32.55	0.0075
	60	33.56	0.0085
	70	34.56	0.0100
45	80	35.56	0.0123
	90	36.55	0.0162
	100	37.55	0.0197
	-20	25.63	0.0071
	-10	26.63	0.0102
	0	27.65	0.0148
	10	28.56	0.0074
	20	29.51	0.0058
	30	30.53	0.0056
	40	31.55	0.0059
65	50	32.56	0.0065
	60	33.57	0.0074
	70	34.56	0.0087
	80	35.56	0.0105
	90	36.55	0.0128
	100	37.54	0.0150
	-20	25.62	0.0060
	-10	26.61	0.0058
	0	27.58	0.0051
	10	28.57	0.0051
20	29.56	0.0053	
30	30.56	0.0055	
40	31.56	0.0056	
50	32.56	0.0059	
60	33.56	0.0063	
70	34.56	0.0071	
80	35.55	0.0081	
90	36.55	0.0097	
100	37.55	0.0125	

Tabla 29. Datos obtenidos en el DSC para la pulpa de aguaymanto

<b>Concentración [°Brix]</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>DSC (mW/mg)</b>
25	-20	25.62	0.0064329
	-10	26.61	0.00974766
	0	27.63	0.01670883
	10	28.66	0.01315987
	20	29.52	0.00940059
	30	30.49	0.00750038
	40	31.52	0.00734685
	50	32.55	0.00793291
	60	33.55	0.00884438
	70	34.55	0.00990507
	80	35.55	0.01159573
45	90	36.56	0.01505538
	100	37.57	0.01706706
	-20	25.63	0.0075737
	-10	26.62	0.01016854
	0	27.64	0.01323022
	10	28.56	0.00788751
	20	29.54	0.00635846
	30	30.55	0.00633841
	40	31.55	0.00666417
	50	32.55	0.00710075
	60	33.55	0.00771253
65	70	34.53	0.00861985
	80	35.53	0.01015415
	90	36.54	0.01164952
	100	37.56	0.01501823
	-20	25.62	0.00671022
	-10	26.61	0.00714295
	0	27.58	0.00453368
	10	28.56	0.00453291
	20	29.57	0.00460471
	30	30.56	0.00472059
	40	31.56	0.00487378
50	32.56	0.00559103	
60	33.55	0.00583917	
70	34.54	0.00618336	
80	35.54	0.00674484	
90	36.54	0.0078116	
100	37.54	0.00974201	

Anexo 7. Propiedades termofísicas de la pulpas de frutas.

Tabla 30. Resultados obtenidos para las propiedades termofísicas de la pulpa de sanky a diferentes temperaturas y concentraciones.

Temperatura (°C)	Concentración (°Brix)	r	(Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kgK)	k (W/mK)	a * 10 <sup>7</sup> (m <sup>2</sup> /s)
	3.3	-	-	-	-	-
-20.0	25	1160.845	993.339	0.004	0.033	
	45	1174.976	1090.994	0.004	0.029	
	65	1182.000	923.812	0.002	0.015	
	3.3	-	-	-	-	
-10.0	25	1280.000	1637.853	0.009	0.044	
	45	1198.444	1626.965	0.008	0.040	
	65	1174.000	921.424	0.001	0.013	
	3.3	-	-	-	-	
0.0	25	1069.091	3707.626	0.027	0.067	
	45	1089.630	2459.013	0.014	0.051	
	65	1077.500	837.899	0.001	0.006	
	3.3	711.013	4997.553	0.105	0.295	
10.0	25	1108.775	2437.184	0.015	0.055	
	45	1207.858	1272.796	0.004	0.027	
	65	1321.789	877.313	0.001	0.005	
	3.3	689.534	5027.192	0.110	0.317	
20.0	25	1105.410	1367.812	0.006	0.037	
	45	1221.484	1033.574	0.002	0.016	
	65	1313.298	943.668	0.001	0.007	
	3.3	667.277	5057.825	0.115	0.342	
30.0	25	1091.628	1230.703	0.004	0.031	
	45	1215.125	1019.994	0.002	0.014	
	65	1307.607	1003.164	0.001	0.007	
	3.3	644.237	5089.452	0.121	0.370	
40.0	25	1090.895	1303.154	0.004	0.031	
	45	1210.585	1123.206	0.002	0.016	
	65	1312.748	1060.151	0.001	0.008	
	3.3	620.410	5122.073	0.128	0.403	
50.0	25	1098.629	1474.509	0.005	0.033	
	45	1209.158	1269.772	0.003	0.019	
	65	1310.809	1153.535	0.002	0.010	
	3.3	595.791	5155.688	0.135	0.441	
60.0	25	1094.204	1715.584	0.007	0.036	
	45	1204.199	1484.751	0.004	0.023	
	65	1307.467	1275.985	0.002	0.012	
	3.3	570.376	5190.296	0.144	0.485	
70.0	25	1091.218	2073.293	0.009	0.039	
	45	1202.820	1801.812	0.006	0.027	
	65	1304.204	1463.703	0.003	0.015	
	3.3	544.159	5225.899	0.153	0.538	
80.0	25	1081.765	2633.284	0.012	0.043	
	45	1189.520	2235.395	0.008	0.030	
	65	1270.237	1721.831	0.004	0.019	
	3.3	517.135	5262.496	0.163	0.601	
90.0	25	1072.644	3545.729	0.018	0.047	
	45	1179.189	2800.300	0.011	0.033	
	65	1261.650	2130.052	0.006	0.023	
	3.3	489.298	5300.086	0.175	0.676	
100.0	25	1067.210	4445.179	0.028	0.059	
	45	1171.442	3380.043	0.014	0.035	
	65	1270.299	2808.218	0.009	0.026	

Tabla 31. Resultados obtenidos para las propiedades termofísicas de la pulpa de aguaymanto a diferentes temperaturas y concentraciones.

Temperatura (°C)	Concentración [°Brix]	r	(Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kgK)	k (W/mK)	a * 10 <sup>7</sup> (m <sup>2</sup> /s)
	12.8	-	-	-	-	-
-20.0	25	1094.5455	988.6991	0.0087	0.0799	
	45	1180.5774	1164.4692	0.0066	0.0481	
	65	1198.7746	1031.6164	0.0038	0.0306	
	12.8	-	-	-	-	
-10.0	25	1060.9524	1556.3373	0.0158	0.0955	
	45	1113.7778	1624.0621	0.0128	0.0706	
	65	1169.0476	1140.4445	0.0049	0.0367	
	12.8	-	-	-	-	
0.0	25	1051.0000	2770.2729	0.0307	0.1056	
	45	1055.2174	2193.9804	0.0201	0.0866	
	65	1096.2500	750.1064	0.0018	0.0221	
	12.8	1047.5643	4630.1488	0.0370	0.0764	
10.0	25	1106.8140	2262.6222	0.0231	0.0923	
	45	1201.8813	1351.5316	0.0074	0.0453	
	65	1325.6181	776.8781	0.0018	0.0177	
	12.8	1046.1811	4651.2750	0.0380	0.0782	
20.0	25	1102.0509	1665.1770	0.0150	0.0819	
	45	1194.6116	1126.9533	0.0037	0.0276	
	65	1322.9089	816.8721	0.0016	0.0151	
	12.8	1044.1604	4672.9513	0.0389	0.0798	
30.0	25	1097.0113	1372.2034	0.0109	0.0727	
	45	1193.2381	1161.9717	0.0037	0.0265	
	65	1321.8290	865.6637	0.0013	0.0117	
	12.8	1041.5025	4695.1777	0.0398	0.0813	
40.0	25	1105.6810	1389.5561	0.0106	0.0691	
	45	1188.5787	1261.7211	0.0044	0.0297	
	65	1320.7796	922.8649	0.0009	0.0077	
	12.8	1038.2071	4717.9541	0.0405	0.0827	
50.0	25	1105.0836	1549.0996	0.0023	0.0694	
	45	1182.0483	1386.8790	0.0055	0.0335	
	65	1318.4883	1092.1835	0.0009	0.0063	
	12.8	1034.2733	4741.2806	0.0412	0.0840	
60.0	25	1102.7738	1780.5068	0.0138	0.0705	
	45	1176.0345	1552.3343	0.0069	0.0380	
	65	1311.0689	1175.4907	0.0015	0.0100	
	12.8	1029.6998	4765.1572	0.0418	0.0852	
70.0	25	1100.9482	2053.4917	0.0161	0.0713	
	45	1162.5365	1786.1097	0.0091	0.0438	
	65	1305.6510	1281.5309	0.0024	0.0145	
	12.8	1024.4846	4789.5839	0.0423	0.0862	
80.0	25	1094.1686	2473.6348	0.0197	0.0730	
	45	1158.4426	2164.6036	0.0127	0.0508	
	65	1290.0438	1438.1596	0.0039	0.0209	
	12.8	1018.6252	4814.5607	0.0427	0.0871	
90.0	25	1082.0757	3302.4769	0.0272	0.0761	
	45	1155.4384	2553.9117	0.0163	0.0552	
	65	1286.6334	1712.5873	0.0066	0.0300	
	12.8	1012.1182	4840.0875	0.0431	0.0880	
100.0	25	1071.3333	3847.4608	0.0315	0.0764	
	45	1149.2838	3384.5915	0.0243	0.0625	
	65	1279.9549	2194.5038	0.0116	0.0413	