

“Madre de Dios, Capital de la Biodiversidad del Perú”

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

TITULO DE LA TESIS:

**“COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA PULPA TAMIZADA DE
COPOAZÚ (*Theobroma grandiflorum*)”**

TESISTA:

Bach. PEDRO JOAQUÍN PÉREZ ALFERES

Para optar al título profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUERTO MALDONADO – PERU

- 2015 -

“Madre de Dios, Capital de la Biodiversidad”

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

TITULO DE LA TESIS:

**“COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA PULPA TAMIZADA DE
COPOAZÚ (*Theobroma grandiflorum*)”**

TESISTA:

Bach. PEDRO JOAQUÍN PÉREZ ALFERES

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PUERTO MALDONADO – PERU

- 2015 -

DEDICATORIA

A mis padres por todo su apoyo, su contante dedicación y esfuerzo en mi formación profesional y personal, por sus sabios consejos y sus acertadas correcciones, para siempre agradecido con ambos.

A Dios por guiarme en mi caminar, para que siempre esté presente amando y perdonándome, cuidando y orientándome en todo momento.

Asimismo, el presente trabajo está dedicado a todas aquellas personas que quieran promover actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación como herramientas que fomenten la competitividad en todos los niveles donde estas sean realizadas.

AGRADECIMIENTOS

Deseo especialmente agradecer:

A la **Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios**, especialmente a la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ingeniería, por la formación académica durante mi permanencia en dicha casa de estudios.

A la **Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco**, en especial al **Dr. Antonio Bueno Lazo** y al **Mg. Julio Lechuga**, por brindarme todas las facilidades para utilizar los ambientes del laboratorio de Ingeniería Química, asimismo al **Quim. Melquiades Herrera**, por su apoyo en las diversas actividades durante la investigación.

Al **Ing. Jesús Manuel Flores Arizaca**, por su asesoramiento y constante apoyo en el desarrollo de la tesis, por aquellas noches interminables de trabajo y por el interés mostrado a lo largo de toda esta etapa.

A toda mi familia por su apoyo permanente y desinteresado, especialmente a mi tía **Vilma Alférez Durán**, por el apoyo brindado en muchas de las gestiones relacionadas al desarrollo de la investigación.

A los miembros del jurado, conformado por el **Ing. Javier Eduardo Díaz Viteri**, **Ing. Raúl Huamán Cruz** y **Dra. Roxana Madueño Portilla**, por todas las sugerencias y acotaciones que contribuyeron a la mejora de la presente investigación.

A todas las demás personas que de alguna manera contribuyeron a la ejecución del siguiente trabajo de investigación.

Pedro Joaquín Pérez Alferes

PRESENTACION

El presente trabajo tiene como finalidad dar a conocer el comportamiento reológico de la pulpa tamizada de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), realizando para ello un estudio reométrico que considero las variables temperatura y concentración, ajustando el comportamiento a modelos reológicos conocidos y finalmente, estableciendo un modelo matemático que describe dicho comportamiento.

El trabajo de investigación consta de tres capítulos, estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I: Marco teórico, donde se consignan todos los antecedentes de la investigación y la revisión bibliográfica de los conceptos relevantes utilizados en el estudio.

Capítulo II: Materiales y Métodos, donde se consignan las generalidades de la investigación, materiales y equipos utilizados, asimismo, se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación.

Capítulo III: Resultados y discusiones, donde se consignan los reportes obtenidos, mediante tablas y figuras, reforzadas por una discusión e interpretación de dichos resultados.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCION	xi
CAPITULO I:.....	1
COPOAZÚ, REOLOGÍA Y REOMETRÍA.....	1
1.1. Antecedentes de estudios realizados	1
1.2. El Copoazú (<i>Theobroma grandiflorum</i>).....	2
1.2.1. Taxonomía del Copoazú.	3
1.2.2. Características del Copoazú.	3
1.2.3. Composición de la pulpa de Copoazú.....	5
1.2.3.1. Azúcares reductores.	5
1.2.4. Utilización del Copoazú.....	6
1.2.5. Producción de Copoazú en Madre de Dios	7
1.3. Reología.....	8
1.3.1. Clasificación reológica de los fluidos	8
1.3.2. Elementos de Reometría.....	16
1.3.3. La Viscosidad	18
CAPITULO II:.....	21
MATERIALES Y METODOS.....	21
2.1. Generalidades	21
2.2. Materiales	21
2.2.1. Materia prima	21
2.2.2. Materiales de acondicionamiento del fruto	21
2.2.3. Materiales de laboratorio.....	21
2.2.4. Equipos	22
2.2.5. Reactivos	22

2.3. Métodos	25
2.3.1. Métodos para Análisis Proximal	25
2.3.2. Metodología	26
2.3.2.1. Descripción del proceso para obtención de pulpa de Copoazú	27
2.3.2.2. Proceso de evaluación del comportamiento reológico	29
CAPITULO III	34
RESULTADOS Y DISCUSION	34
3.1. Caracterización Físico – Química de la pulpa de Copoazú (<i>T. grandiflorum</i>)	34
3.2. Comportamiento reológico de la Pulpa de Copoazú (<i>T. grandiflorum</i>)	34
3.3. Efecto de la temperatura y la concentración.	41
3.4. Modelamiento reológico de la pulpa de Copoazú	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS	54

INDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.1	Clasificación taxonómica del Copoazú.....	3
Tabla 1.2	Composición porcentual del Copoazú, según diferentes autores	5
Tabla 1.3	Composición proximal de la pulpa de Copoazú).....	6
Tabla 1.4	Madre de Dios: principales indicadores de producción de Copoazú.....	7
Tabla 2.1	Análisis proximal de la pulpa de Copoazú.....	25
Tabla 2.2	Prueba error: parámetros reológicos en función del % del Torque.....	31
Tabla 3.1	Análisis proximal de la pulpa de Copoazú (<i>T. grandiflorum</i>).....	34
Tabla 3.2	Valores reológicos de la pulpa de Copoazú (<i>T. grandiflorum</i>).....	35
Tabla 3.3	Parámetros del modelo de Ley de la Potencia.....	37
Tabla 3.4	Parámetros del modelo de Bingham para pulpa de Copoazú.....	38
Tabla 3.5	Parámetros del modelo de Herschel & Bulkley.....	39
Tabla 3.6	Parámetros del modelo de Casson para pulpa de Copoazú.....	40
Tabla 3.7	Variables de estudio para el efecto de la temperatura	42
Tabla 3.8	Índice de comportamiento de flujo para la pulpa de Copoazú.....	43
Tabla 3.9	Variables de estudio para el efecto de la concentración.....	45

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Variedades del fruto Copoazú (<i>Theobroma grandiflorum</i>).....	4
Figura 1.2 Madre de Dios: producción de Copoazú, 2010 hasta 2015 (t).....	7
Figura 1.3 Clasificación del comportamiento reológico.....	10
Figura 1.4 Viscosidad aparente en fluidos independientes del tiempo.....	12
Figura 1.5 Reograma de fluidos independientes del tiempo.....	12
Figura 1.6 Comportamiento de fluidos independientes del tiempo.....	16
Figura 1.7 Reómetro de cilindros concéntricos.....	18
Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso para obtención de pulpa.....	26
Figura 2.2 Recolección de materia prima Copoazú	27
Figura 2.3 Despulpado de materia prima Copoazú	28
Figura 2.4 Embolsado y sellado de la pulpa de Copoazú	28
Figura 2.5 Diagrama de flujo de procedimiento experimental.....	29
Figura 2.6 Análisis proximal de la pulpa de Copoazú.....	30
Figura 2.7 Reómetro Brookfield y accesorio UL Adapter.....	31
Figura 2.8 Programa de trabajo para estudio reométrico de Copoazú.....	32
Figura 2.9 Interfaz del usuario Rheocalc V3.1-1.....	32
Figura 3.1 Relación entre esfuerzo cortante y gradiente de velocidad.....	35
Figura 3.2 Relación entre viscosidad y gradiente de deformación de Copoazú.....	36
Figura 3.3 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico.....	44
Figura 3.4 Efecto de la concentración sobre el comportamiento reológico.....	46
Figura 3.5 Comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú	47

RESUMEN

El positivo desarrollo del sector industrial en la selva peruana, y específicamente en el departamento de Madre de Dios, con el desarrollo de nuevos productos provenientes de la Biodiversidad Amazónica, se ha constituido como una oportunidad para el desarrollo de la agroindustria nacional, a través de la transformación y generación de valor agregado de sus productos. En relación a lo mencionado, el presente estudio evalúa la reología como una de las propiedades relevantes en el procesamiento de numerosas áreas de la industria de alimentos, tomando para ello una fruta tropical de origen amazónico, el Copoazú.

Esta investigación emplea los conceptos de reometría para alimentos procesados que presentan comportamiento reológico no newtoniano para estudiar las propiedades de la pulpa tamizada de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*). Este trabajo de carácter experimental, utilizó como variables la temperatura, la concentración y su efecto sobre la viscosidad. Posteriormente se determinó el comportamiento reológico de la muestra ajustada al modelo reológico de Herschel & Bulkley. Finalmente, se procedió a establecer el modelo matemático que describe dicho comportamiento para el caso específico.

El desarrollo de la investigación considera analizar las muestras a las temperaturas de 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C, y a las concentraciones de 14, 8, 6, 4 y 3 °Brix, utilizando para ello un reómetro Brookfield DVIII de cilindros concéntricos una interfaz de control reológico Rheocalc V.3.1-1. Asimismo, se ajustaron los resultados a los modelos reológicos de Ley de la Potencia, Casson, Herschel & Bulkley y Plástico de Bingham. Los principales resultados obtenidos mostraron que el modelo de Herschel & Bulkley fue quien mejor describió el comportamiento reológico de la muestra analizada con un coeficiente de determinación igual a $R^2_{Adj} > 0.97$, descrito finalmente por un modelo matemático que refleja un índice de consistencia (K_H) de 9.62 y un índice de comportamiento de flujo n_H de 0.80, ambos adimensionales. Finalmente se realizó un ajuste lineal a los datos de viscosidad aparente evaluando el efecto de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa tamizada de Copoazú.

Palabras Clave: Reometría, viscosidad, fluido no newtoniano, reología, tamizada.

ABSTRACT

The outstanding development of the industry sector in the amazon region, and specifically in the department of Madre de Dios with the development of new products originating from the vast biodiversity of the amazon rainforest, has become an increasing opportunity for the development of the national industry of agricultural products, through the transformation and generation of added value of the products. Related to all this mentioned lines above, the present study evaluates the rheology as one of the relevant properties in the processing of numerous areas of the food industry, taking for that one tropical fruit of amazonic origins, the Cupuassu.

This investigation employs the concepts of rheometry for processed foods that presents rheological non-Newtonian behavior for the study of the properties of the sieve pulp of Cupuassu. This experimental study takes in consideration variables as the temperature, the concentration and their effect over the viscosity. Subsequently, the study determine the rheologic behavior of the sample adjusted to the rheological model of Herschel & Bulkley. Finally, the study establishes a mathematical model that describes the behavior for the specific case.

The development of the investigation analyzes the samples at different temperatures of 20 °C, 30 °C, 40 °C y 50 °C, and in concentration of 14, 8, 6, 4 y 3 °Brix, using for this a rheometer Brookfield DVIII with concentric cylinders and a rheologic control interface Rheocalc V.3.1-1. As well, the results were adjusted to the rheological models of the Power Law, Casson, Herschel & Bulkley and Bingham plastic. The principal results obtained showed that the model of Herschel & Bulkley is the one that best describes the rheologic behavior of the sample analyzed with a determination coefficient of $R^2_{Adj} > 0.97$, described by a mathematical model that reflects a consistency index (K_H) of 9.62 and an index of flow (n_H) of 0.80, both with no dimensions. Finally, the study performs an adjustment to the viscosity data evaluating the effect of the temperature and concentration over the rheologic behavior of the sieve pulp of Cupuassu.

Keywords: Rheometry, Viscosity, Non- Newtonian fluid, sieve

INTRODUCCION

Las frutas tropicales del oriente peruano han sido objeto de poco o ningún estudio inclusive con respecto a la determinación de sus propiedades físicas y, en particular del comportamiento reológico de sus derivados (Chirif, 2006). Dentro de estas frutas destaca el Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), el cual, a pesar de sus posibilidades promisorias, desde el punto de vista de su exportación como producto semi - procesado o procesado, tiene como uno de sus principales obstáculos, la falta de estandarización de propiedades funcionales, físico - químicas y de transporte (reológicas, térmicas) y propiedades bioactivas; que constituyen, patrones de calidad exigidos por un mercado competitivo basados en el desarrollo tecnológico. En ese sentido, el conocimiento de los parámetros reológicos contribuye favorablemente en el diseño de equipos y procesos, la mejora de las características organolépticas, el control de calidad y la estandarización (Novoa & Ramírez, 2012)

Así mismo, el estudio del comportamiento reológico de pulpas de frutas en función a su microestructura, variaciones de temperatura y concentración, razón de la tensión de cizallamiento son de vital importancia en numerosas áreas de la industria de alimentos, como los cálculos de ingeniería de procesos que involucran un amplio espectro en el diseño de equipos tales como sistemas de tuberías, bombas, extrusores, mezcladores, intercambiadores de calor, reactores, evaporadores, etc., así como la determinación de la funcionalidad de ingredientes en el desarrollo de productos, control de calidad nivel intermedio o en producto final, pruebas de vida útil del producto, evaluación de la textura de alimentos y análisis de ecuaciones reológicas de estado o ecuaciones constitutivas. Cabe destacar, además, que el estudio del comportamiento reológico de los cuerpos contribuye el conocimiento de su estructura; por ejemplo, existe cierta relación entre el tamaño y forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como entre el grado de entrecruzamiento de los polímeros y su elasticidad (Muller, 1973).

De las referencias bibliográficas consultadas, podemos indicar que, la investigación reológica para la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) es casi nula o demasiado incipiente, se encontraron trabajos de investigación como el desarrollado por Pizarro et al., (2010), determino el comportamiento reológico del Copoazú, en función de la temperatura (10, 15, 20, 25 y 30 °C), utilizó para ello un Viscosímetro

rotativo Brookfield RVT, ajustando a los modelos reológicos de Ley de la Potencia, Casson y Herschel . Bulkley (H - B), obteniendo el mejor ajuste definido por el modelo de H -B, sin embargo no existe un estudio detallado en el cual se haya establecido la variación del índice de fluidez e índice de consistencia, en función a las variaciones de los parámetros tales como temperatura, concentración de sólidos solubles, razón de variación de la tensión de cizallamiento, y éstas ajustados a modelos no newtonianos.

Desde el punto de vista de la relación de la reología y el uso de la pulpa de frutos, es muy importante en áreas como la fabricación de jugos, néctares, refrescos, desayunos, helados, yogures y otros, en el cual generalmente se utilizan los frutos en forma de pulpa concentrada, por tanto es necesario una serie de nociones al respecto de sus características, con la mirada hacia la adaptación a los procesos e instalaciones industriales, cumpliendo las exigencias específicas de cada uno de esos productos. (Queiroz, 1998). El comportamiento reológico de los fluidos alimenticios, como pulpas y jugos de frutas, es un factor de mayor importancia en el dimensionamiento de los equipos de la industria procesadora, al punto de constituirse en uno de los factores de validación de la calidad de un producto (Pereira, 2002).

Durante el procesamiento, almacenamiento, comercialización y consumo, los alimentos presentan diferentes concentraciones y están sujetos a diferentes temperaturas. El conocimiento del comportamiento reológico de jugos o pulpas de frutas es fundamental en ingeniería de procesos y equipamiento. La definición de modelos adecuados es necesaria en el proyecto de tubulaciones, de bombas, de sistemas de agitación y de mezclado. El efecto de la temperatura y de la concentración sobre el comportamiento reológico necesita ser conocido para el entendimiento y dimensionamiento de las operaciones unitarias tales como tratamiento térmico y concentración (Bezerra, 2000).

El proceso de concentración resulta de la remoción de agua y la subsecuente reducción de los costos de embalaje, transporte y almacenamiento. La viscosidad aparente de los productos varía considerablemente durante este tipo de proceso, al punto de inviabilizar la producción de los mismos con mayores concentraciones.

En cuanto al *objetivo general* de este trabajo, se ha propuesto establecer un modelo matemático que describa adecuadamente el comportamiento reológico de la Pulpa tamizada de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) reflejándose la relación funcional

entre la tensión de cizallamiento y el desplazamiento del fluido como funciones de la variación de temperatura y concentración en sólidos solubles de la pulpa.

A continuación, los objetivos específicos son los siguientes:

Primer objetivo específico: Estudiar el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, a en relación de la temperatura y la concentración, desarrollando para esto un programa de reometría que determine todos los parámetros reológicos durante el análisis del comportamiento de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Segundo objetivo específico: Evaluar el efecto de la temperatura y la concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Tercer objetivo específico: Determinar el modelo reológico que mejor se ajuste al comportamiento de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) y a continuación, desarrollar un modelo matemático que relación dicho modelo con los parámetros obtenidos en la fase experimental, validándose en función a los parámetros de su respectivo modelo.

En lo que respecta a la *hipótesis principal* planteada por esta investigación, esta sostiene que la relación funcional entre la tensión de cizallamiento y la tasa de deformación, como funciones de la variación de la temperatura y concentración de solidos solubles de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), se ajustan apropiadamente al modelo reológico de Herschel – Bulkley, donde el índice de consistencia se incrementa con el cambio de la temperatura y los índices de comportamiento de flujo aumentaran con el calentamiento.

El *desarrollo* de la investigación incluye tres capítulos, el primer capítulo está dividido en tres secciones, la primera aborda el estado del arte de la investigación, la segunda parte contempla conceptos y definiciones relevantes acerca de la materia de estudio, el Copoazú, y finalmente, la tercera sección expone la revisión bibliográfica sobre reología y las definiciones pertinentes al tema de investigación.

El segundo capítulo, se encuentra dividida en dos contenidos importantes la primera relacionada a los materiales y equipos utilizados para la presente investigación, la segunda contiene la descripción de los métodos y en general, la metodología de desarrollo de la investigación.

El tercer capítulo se concentra en demostrar los resultados obtenidos de las pruebas reológicas elaboradas a nivel experimental, presenta tablas y gráficos del comportamiento y los parámetros reológicos, asimismo se precisa el modelamiento matemático en función al modelo reológico que se ajusta para la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), finaliza con la presentación de las conclusiones y discusiones a partir de los resultados encontrados, en relación a los objetivos de la investigación y tomando como referencia el marco teórico presentado.

En conclusión, en el presente estudio se evalúa el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), estudiando dicho comportamiento en función de variables como la temperatura y la concentración, para finalmente realizar el modelamiento matemático según el modelo reológico que mejor se ajuste al comportamiento del producto.

CAPITULO I: COPOAZÚ, REOLOGÍA Y REOMETRÍA

1.1. Antecedentes de estudios realizados

Existen diversos estudios que estudiaron el comportamiento reológico de diferentes frutas y en diferentes condiciones, los más relevantes serán brevemente descritos a continuación y según el criterio de importancia y pertinencia que guarden con la presente investigación.

Pizarro et al., (2010), determino el comportamiento reológico del Copoazú, en función de la temperatura (10, 15, 20, 25 y 30 °C), utilizó para ello un Viscosímetro rotativo Brookfield RVT, ajustando a los modelos reológicos de Ley de la Potencia, Casson y Herschel . Bulkley (H - B), obteniendo el mejor ajuste definido por el modelo de H –B, presentando las muestras un comportamiento no newtoniano con carácter pseudoplástico. Los valores del índice de consistencia (K_H), según el mejor ajuste, variaron entre $7,8 \times 10^3$ (Pa.sⁿ) y $37,7 \times 10^3$ (Pa.sⁿ), decreciendo con el aumento de la temperatura, respecto a los índices de comportamiento de flujo (n_H) variaron entre $0,29 \times 10^{-3}$ y $1,16 \times 10^{-3}$ y aumentaron con el incremento de la temperatura.

Ferreira, De Melo, Silvestre, & Gasparetto (2002), estudiaron el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de las pulpas de Caju (Marañón) Goiaba (Guayaba), analizando el comportamiento reológico de ambas materias, a seis diferentes temperaturas, desde 10 °C hasta 60 °C con incrementos de 10 °C respecto a la medición anterior, utilizaron un reómetro "Haake Rotavisko", ajustando sus datos experimentales al modelo de Mizrahi – Berk, el cual describió de manera satisfactoria el comportamiento reológico de la pulpa de Goiaba, obteniendo un resultado diferente para la pulpa de Caju, la cual no pudo ser descrita con modelos convencionales.

Vriesmann, Silveira, & Petkowicz (2009), estudiaron las propiedades químicas y reológicas la fracción predominante de la pulpa de Copoazú (Carbohidratos), observando un comportamiento no newtoniano, además resulta relevante mencionar que determinaron una alta viscosidad y la capacidad de gelificación de la pulpa. Los resultados obtenidos por los investigadores demostraron que el modelo de Herschel – Buckley ($R^2 \geq 0,98$) fue el más adecuado para describir el comportamiento reológico de la muestra de estudio, asimismo consideraron la aplicación de otros dos modelos: Ley de Potencia y modelo de Bingham.

Por otro lado, Pizarro, et al. (2012), determinaron el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa integral de zapote (*Calocarpum sapota*), con un rango de temperatura de 10 °C a 65 °C, procesando la materia prima en una planta piloto de procesamiento de la Universidad de Córdoba, utilizaron un Viscosímetro Brookfield DV-II y ajustaron los datos de viscosidad al modelo reológico de “Ley de Potencia” ($R^2 \geq 0,9958$), el índice de consistencia del producto disminuyó con la temperatura y el índice de comportamiento de flujo aumento.

Finalmente, Novoa & Ramírez (2012), contribuyeron al estudio de los parámetros reológicos, en este caso estudiaron el comportamiento reológico del manjar blanco, estudiando cuatro diferentes marcas comerciales de dicho producto, utilizando para la medición un reómetro TA Instruments, modelo AR 2000Ex. Finalmente ajustaron los modelos reológicos al modelo de “Ley de Potencia”.

1.2. El Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

El Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) es un pariente muy cercano del cacao, originario de la amazonía oriental, considerado una fruta tropical promisoriosa de los trópicos húmedos. Sus frutos contienen una pulpa de buen sabor y aroma agradable, la cual suma aproximadamente un 40 % del peso total de la fruta fresca (Vriesmann et al., 2009). En base a esto, el principal producto obtenido de la fruta del Copoazú es la pulpa congelada del fruto al natural. Para tal efecto, la pulpa es extraída cumpliendo normas de calidad que permiten conservar su exquisito sabor y agradable aroma. La pulpa es utilizada para preparar refrescos, helados, néctares, mermeladas, vino, licores y otros productos frescos (Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2010).

La pulpa (endocarpio), materia prima de la presente investigación, es comestible, de coloración amarilla, cremosa y sabor ácido, sabor y aroma muy propios de la especie. Sus usos están destinados a la alimentación en jugos, mermeladas néctares o pulpas, lácteos, confitería (Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2010).

En las dos últimas décadas, el cultivo del Copoazú ha experimentado un progreso significativo, siendo una de las especies que rompió el ciclo extractivista de cosecha, siendo cultivada, en mayor o menor escala, en todos los estados de la Amazonia brasileña y peruana. Este hecho ha despertado el interés para la industrialización de sus productos y subproductos, multiplicándose rápidamente el número de pequeñas

empresas que producen pulpa congelada o elaboran néctares, licores, jaleas, dulces, sorbetes, yogurt y bombones. (Tratado de Cooperación Amazónica, 1999).

1.2.1. Taxonomía del Copoazú.

El Copoazú pertenece a la familia Sterculiaceae, que abarca aproximadamente 65 géneros y cerca de 1000 especies, con una distribución predominantemente tropical y subtropical. En Brasil, esta familia está representada por once géneros y cerca de 115 especies.

En el sistema de clasificación de Cronquist (1981), citado por el Tratado de Cooperación Amazónica (1999) indica que la especie está ordenada en la siguiente secuencia jerárquica:

Tabla 1.1: Clasificación taxonómica del Copoazú.

Clasificación taxonómica			
Reino	Plantae	Familia	Sterculiaceae
Subreino	Tracheobionta	Subfamilia	Byttnerioideae
División	Magnoliophyta	Tribu	Theobromeae
Clase	Magnoliopsida	Genero	<i>Theobroma</i>
Subclase	Dilleniidae	Especie	<i>grandiflorum</i>

Fuente: (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, 1999)

1.2.2. Características del Copoazú.

El Copoazú, a diferencia del cacao, presenta más pulpa que semilla, en una relación aproximada de 2 a 1, Vriesmann (2009), refiere que el contenido de pulpa es del 40 % del peso total del fruto, por otro lado investigaciones realizadas por el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "Sinchi" (Colombia), indicaron que el fruto tiene un peso promedio de 1.308 gramos, el color de la pulpa es amarillo crema y de aroma fuerte característico, asimismo, la semilla se ven envueltas por la pulpa, estas contienen una grasa aromática parecida a la manteca del Cacao (Sinchi & Pronatta, 2000).

Respecto al se conocen diferentes variedades que, en términos generales, se caracterizan por su forma o según su cáscara o corteza, y se distinguen tres grupos, los cuales se pueden apreciar en la Figura 1.1 presentada a continuación:

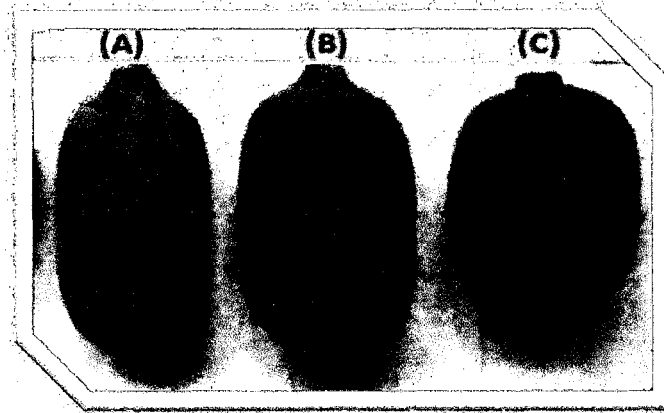


Figura 1.1: Variedades del fruto Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, 1999)

- **COPOAZÚ REDONDO (A):** Es la variedad más común de la Amazonía, los frutos presentan extremos redondeados, y su cáscara tiene de 6 a 7 mm de grosor.
- **COPOAZÚ MAMORANA (B):** Sus frutos son los de mayor tamaño en todas las variedades conocidas, sus extremos son más ovalados, pesa aproximadamente 2.5 a 4 Kg. y su cáscara es más gruesa, entre 7 y 9 mm.
- **COPOAZÚ MAMAU (C):** Su mayor característica es la carencia de semillas también recibe los nombres de Copo sin semilla o Copoazú sin semilla y pesa aproximadamente 1.5 Kg.

Según lo mencionado anteriormente, la pulpa y las semillas son las partes aprovechables del fruto. La primera, en la que se asienta la presente investigación, se constituye como la parte de mayor valor económico, se utiliza principalmente en la elaboración de refresco, néctar, helados, dulces, crema y licor, en tanto que la segunda es utilizada, aunque en pequeña escala, en la elaboración de un producto semejante al chocolate, denominado "Cupúlate" (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, 1999).

En lo que respecta a la composición del fruto, y de acuerdo a la revisión bibliográfica, se recogió información relacionada a la composición centesimal del fruto, la misma que está representada por 44,6% de corteza (epicarpio + esocarpio), 37,7% de pulpa (endocarpio) y por 17,7% de semillas.

Considerando las porciones aprovechables del fruto, o sea, la pulpa y Las semillas, el rendimiento de la parte útil del fruto alcanza al 55,4%. Se hace referencia a la composición del fruto con algunos aportes recogidos, los cuales se muestran en la Tabla 1.2 a continuación:

Tabla 1.2: Composición porcentual del Copoazú, según diferentes autores, (Porcentajes)

<i>PARTE DEL FRUTO</i>	<i>SANTOS & CONDURÚ</i>	<i>BARBOSA, NAZARÉ & NAGATA</i>	<i>CALZAVARA, MÜLLER & KAWAGE</i>	<i>MEDIA</i>
<i>Corteza (%)</i>	46,0	42,0	46,0	44,6
<i>Pulpa (%)</i>	37,0	40,0	36,0	37,7
<i>Semilla (%)</i>	17,0	18,0	18,0	17,7

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores mencionados (2015)

1.2.3. Composición de la pulpa de Copoazú.

La pulpa de Copoazú es un producto no concentrado, no diluido, no concentrado, con una parte mínima de sólidos totales, provenientes de la parte comestible del fruto, en la Tabla 1.3 se presenta la composición proximal de la pulpa de Copoazú en base a un contenido de 100 gramos de porción comestible y sus respectivos porcentajes de composición.

1.2.3.1. Azúcares reductores.

Los azúcares reductores son todos aquellos azúcares con un grupo aldehído o cetona cuya capacidad reductora está libre (Alcázar, 2002), en lo que respecta a las ciencias alimentarias, los azúcares reductores más importantes son la Glucosa y Fructosa; entre los disacáridos se cuentan Lactosa y Manosa.

Como ya se mencionó anteriormente, los azúcares reductores en disolución se encuentran en forma de cadena abierta aldehído o cetona y no en forma de anillo estable. El fundamento principal de estos compuestos radica en que poseen un grupo carbonilo intacto, a través del cual pueden realizar reacciones de reducción de otras moléculas (Matissek, Schnepel & Steiner, 1998).

Tabla 1.3: Composición proximal de la pulpa de Copoazú
(*Theobroma grandiflorum*)

COMPONENTE	UNIDAD	1	2
Acidez		2,15	2,15
Brix		10,80	11,17
PH	gramos	3,30	3,45
Humedad	gramos	89,00	87,27
Aminoácidos	mg	21,90	
Extracto Etéreo	gramos	0,53	0,41
Cenizas	gramos	0,67	0,70
Fibras	gramos	0,50	1,04
Proteínas		0,923	1,31
Carbohidratos	gramos	11,00	9,27
Azúcares reductores	gramos	3,00	6,29
Pectina	mg	3900	

Fuente: ¹Villachica (1996) ,²INIAP (2008)

1.2.4. Utilización del Copoazú.

El Copoazú es utilizado principalmente en la industria alimentaria, pero con un nivel de desarrollo incipiente, la industrialización de esta fruta exótica constituye un paso importante para el aprovechamiento del bosque húmedo tropical, trayendo consigo beneficios socio-económicos para la región y el sector agroindustrial. (Food and Agriculture Organization, 1996). Sus frutos contienen una pulpa de buen sabor y aroma agradable y el principal producto obtenido de la fruta del Copoazú es la pulpa congelada del fruto al natural. Para tal efecto, la pulpa es extraída cumpliendo normas de calidad que permiten conservar su exquisito sabor y agradable aroma. La pulpa es utilizada para preparar refrescos, helados, néctares, mermeladas, vino, licores confitería, jaleas y otros productos frescos. De las semillas del fruto se obtiene manteca de Copoazú, muy utilizada en la formulación de cosméticos hidratantes y en la industria alimenticia. De las semillas molidas se obtiene una pasta similar al chocolate de cacao, denominada "Copulate". Finalmente, la cáscara es usada como abono orgánico en los sistemas agroforestales y debidamente procesada constituye un componente en el alimento para animales de cría. (Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2010).

1.2.5. Producción de Copoazú en Madre de Dios

La producción de Copoazú en Madre de Dios ha tenido un crecimiento sostenido en los últimos años, según información de la Oficina de Estadística Agraria de la Dirección Regional de Agricultura de Madre de Dios el año 2014 se cosecharon alrededor de 300 toneladas del fruto, siguiendo la misma referencia la Tabla 1.4 nos presenta los principales indicadores

Tabla 1.4: Madre de Dios: principales indicadores de producción de Copoazú, 2014

COPOAZÚ EN CIFRAS, 2014	
Superficie cosechada en (ha./año)	175,5
Rendimiento del cultivo (Kg/ha.)	1,681
Precio del fruto en campo (Nuevos soles/Kg.)	5,22

Fuente: Dirección de Agricultura – MDD, (2015).

Asimismo, se tiene prevista una producción superior a las 400 toneladas al culminar el presente año., la figura 1.2 nos presenta un detalle del crecimiento en la producción de Copoazú en la región en el periodo 2010 hasta 2015, a continuación:

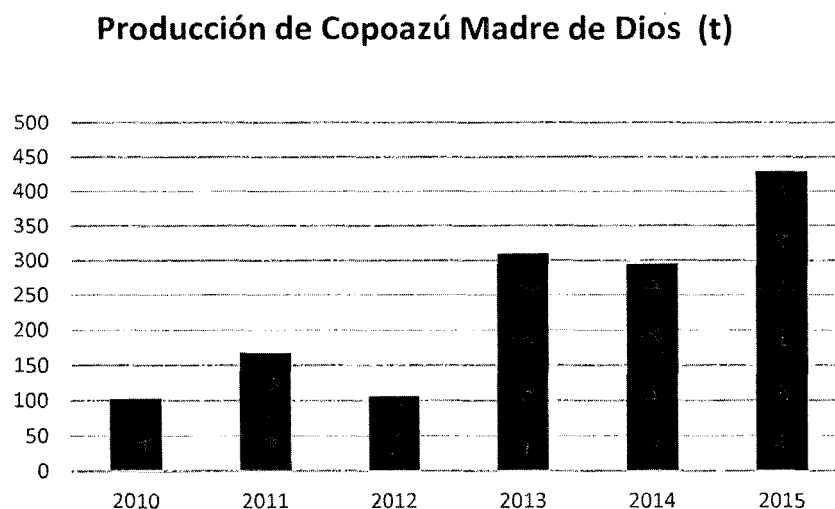


Figura 1.2: Madre de Dios: Producción de Copoazú, 2010 hasta 2015 (t)

Fuente: Elaboración propia (2015), a partir de Dirección de Agricultura – MDD

Finalmente, es prudente mencionar que el Copoazú se constituye como uno de los productos que forman parte del potencial agroindustrial de Madre de Dios, el presente trabajo de investigación ha contemplado este aspecto y ha sido desarrollado en función a futuros conocimientos técnicos que se incurrirían durante el desarrollo de la agroindustria a nivel regional y nacional.

1.3. Reología

La reología es la ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo, estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes. En ese sentido, se entiende que la información reológica de un alimento es la base para el diseño y control de procesos de producción industrializada, la innovación y el desarrollo de nuevos productos, y su control de calidad. (Novoa & Ramírez, 2012)

La reología, es decir “la ciencia del flujo y la deformación”, estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas, materiales cristalinos y otros. Por lo tanto, el campo de la reología se extiende, desde la mecánica de fluidos newtonianos por una parte hasta la elasticidad de Hooke por otra. La región comprendida entre ellas corresponde a la deformación y flujo de todos los tipos de materiales pastosos y suspensiones (Larenas, 2010).

El comportamiento reológico, en estado estacionario, de la mayor parte de los fluidos puede establecerse mediante una forma generalizada de la ecuación:

$$\sigma_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy} \quad (\text{Ec. 1})$$

En la que la viscosidad η disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ($-dv_x / dy$) el comportamiento se denomina pseudoplástico; y dilatante en las que aumenta con dicha gradiente. Si η resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como newtoniano, y entonces $\eta = \mu$ (Bird, 1998).

1.3.1. Clasificación reológica de los fluidos

Se define un fluido como una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar cuán pequeño sea ese esfuerzo.

De todas las propiedades de los fluidos, la viscosidad requiere la mayor consideración en el estudio de flujo de fluidos. La viscosidad es aquella propiedad de un fluido por virtud de la cual ofrece resistencia al corte (Streeter, 1996).

El esfuerzo cortante es el componente de fuerza aplicada tangencial al plano sobre el cual actúa la fuerza. Se expresa en unidades de fuerza por unidad de área. Es un vector que posee magnitud y dirección. La relación de deformación es el gradiente de velocidad establecido en un fluido como resultado de un esfuerzo de corte aplicado. Se expresa en unidades de segundo recíproco (Gonzales, 2009).

La Sociedad de Reología es uno de los cinco miembros fundadores del Instituto Americano de Física. Además, la sociedad está afiliada al Comité Nacional de Estados Unidos en Mecánica Teórica y Aplicada. Por otra parte, la sociedad es también un miembro del Comité Internacional de reología, el cual organiza el congreso internacional de reología, celebrado cada cuatro años.

El comité de nomenclatura de la Sociedad de Reología recomienda que σ sea usado para denotar el esfuerzo de corte y que τ sea usado para denotar el tiempo de relajación y el tiempo de retardo.

El mismo comité recomienda que $\dot{\gamma}$ sea usada para denotar la tasa de corte (Bourne, 1982). En adelante, para el presente estudio, se empleará esta nomenclatura para referirse a estos conceptos aclarando que algunos reólogos aún utilizan la nomenclatura antigua en sus investigaciones.

Para visualizar la clasificación del comportamiento reológico de los fluidos, frecuentemente se utilizan los llamados reógramas, éstos son gráficos de esfuerzo cortante versus relación de deformación. Un esquema de clasificación simple del comportamiento reológico de los fluidos se presenta en la figura 1.3.

La clasificación de fluidos presentada en este esquema no implica necesariamente que cada uno de los comportamientos presentados sea mutuamente excluyente. Si se considera, por ejemplo, el comportamiento elástico que presentan las masas, sobresale el hecho de que este material puede ser pseudoplástico y dependiente del tiempo simultáneamente. Existen múltiples factores que pueden influir en el comportamiento reológico de alimentos, el envejecimiento es uno de ellos.

Si se evalúa el ketchup de tomate inmediatamente después de su fabricación, éste se comporta como un fluido independiente del tiempo y pseudoplástico, pero con el paso del tiempo el material forma una estructura de gel débil lo que implica que al momento de ser usado por el consumidor exhibe comportamiento tixotrópico. Esto explica porque agitar el ketchup en su envase, hace que el condimento fluya más fácilmente (Steffe 1996).

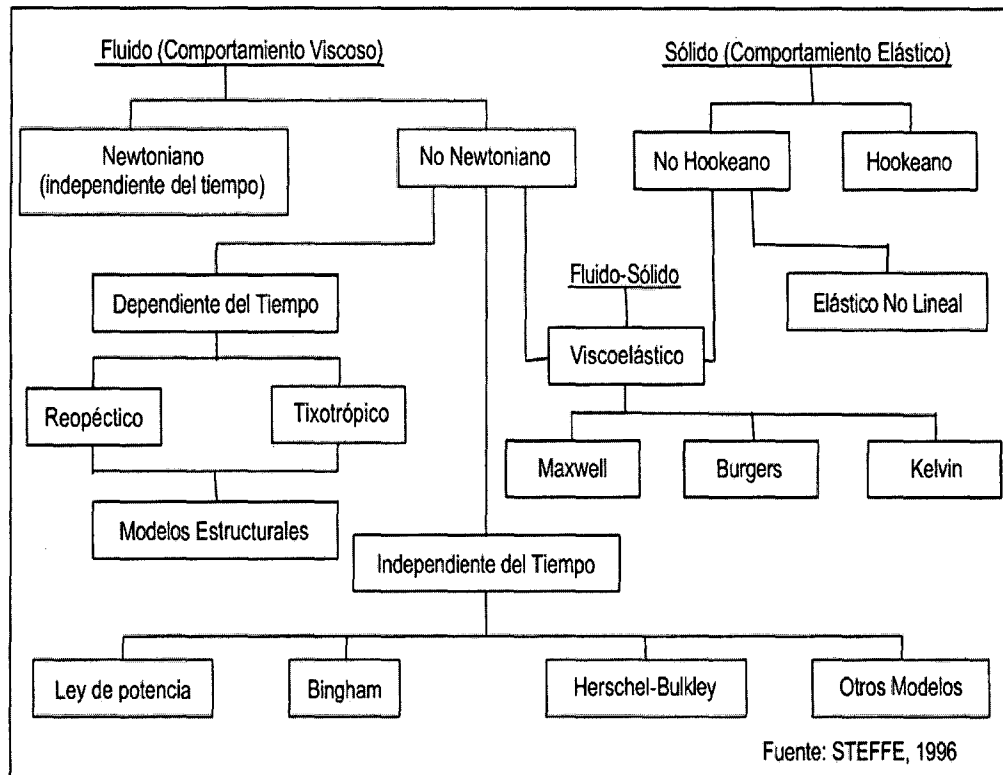


Figura 1.3: Clasificación del comportamiento reológico

Fuente: Steffe, 1996

A continuación se definen, de manera global, los modelos reológicos usados más frecuentemente para describir las propiedades de flujo de los alimentos:

A. Fluidos Newtonianos.

Son líquidos cuyos coeficientes de viscosidad son constantes para una temperatura dada. Es decir, cuando el fluido es sometido a esfuerzos de corte (τ) se desarrollan relaciones de deformación (γ) directamente proporcionales a la velocidad de deformación (Kyereme et al., 1999).

$$\mu = \frac{\sigma}{\gamma}$$

(Ec. 2)

Dónde:

μ = Viscosidad newtoniana (Pa s)

σ = Esfuerzo de corte (Pa)

γ = Relación de deformación (s^{-1})

Los fluidos newtonianos por definición, presentan una línea recta que relaciona $\sigma - \gamma$ con intercepto cero y pendiente igual a μ . Todos los fluidos que no exhiben este comportamiento pueden ser llamados no newtonianos (Steffe, 1996).

Algunos ejemplos de fluidos newtonianos son el agua, té, café, cerveza, bebidas carbonatadas, jugos filtrados, leche, aceite comestible, almíbar de azúcar y mayoría de mieles (Bourne, 1982).

B. Fluidos no newtonianos

Los fluidos viscosos no newtonianos no presentan proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte, la viscosidad recibe el nombre de viscosidad aparente y es función de la relación de deformación (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999); son fluidos plásticos, que pueden presentar cierta elasticidad por debajo de un determinado umbral de presión de corte.

En referencia a lo anterior, estos fluidos tienen una estructura compleja, en la cual intervienen, generalmente, dos fases como ocurre en emulsiones y suspensiones (Cheftel et al., 1983), las mismas que comprenden las fases sólidas y líquidas propias de un determinado material.

En la figura 1.4, se presenta la gráfica de viscosidad aparente (Pa.s) versus relación de deformación (s^{-1}) con la curva que caracteriza cada modelo reológico de fluidos independientes del tiempo, considerando los modelos reológicos que serán evaluados al comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*), en el presente estudio, a continuación:

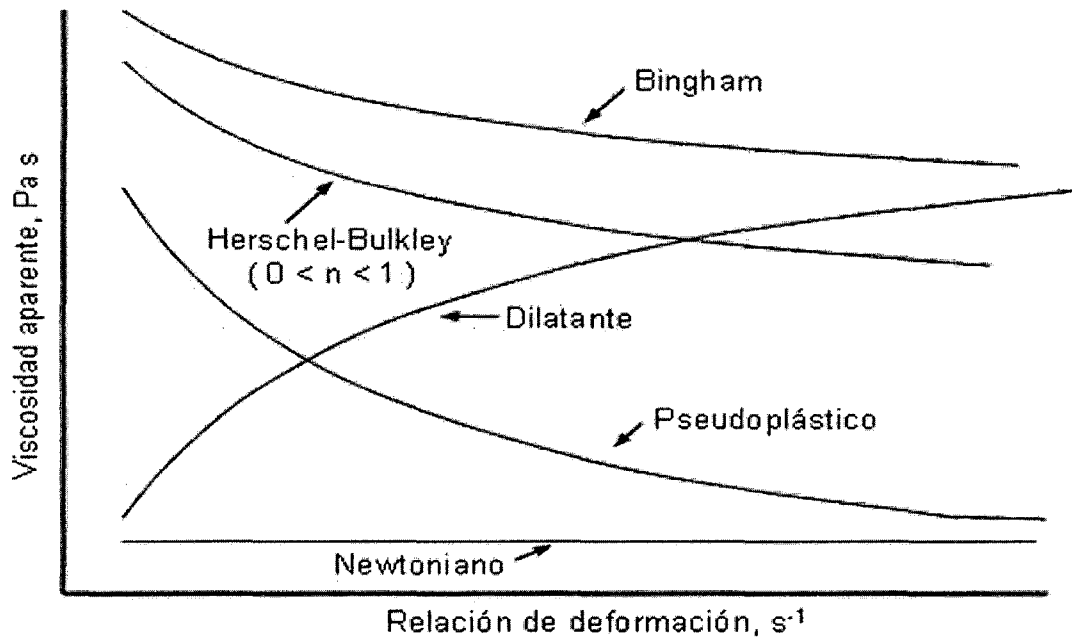


Figura 1.4: Viscosidad aparente en fluidos independientes del tiempo

Fuente: Steffe, 1996

Asimismo, se presenta también un reógrama de fluidos independientes del tiempo, el cual considera las tendencias para de comportamiento reológico, ajustada a modelos no newtonianos, entre los cuales destacan: Herschel – Bulkley y Bingham, la figura 1.5 muestra el reógrama de cada uno de estos comportamientos, a continuación:

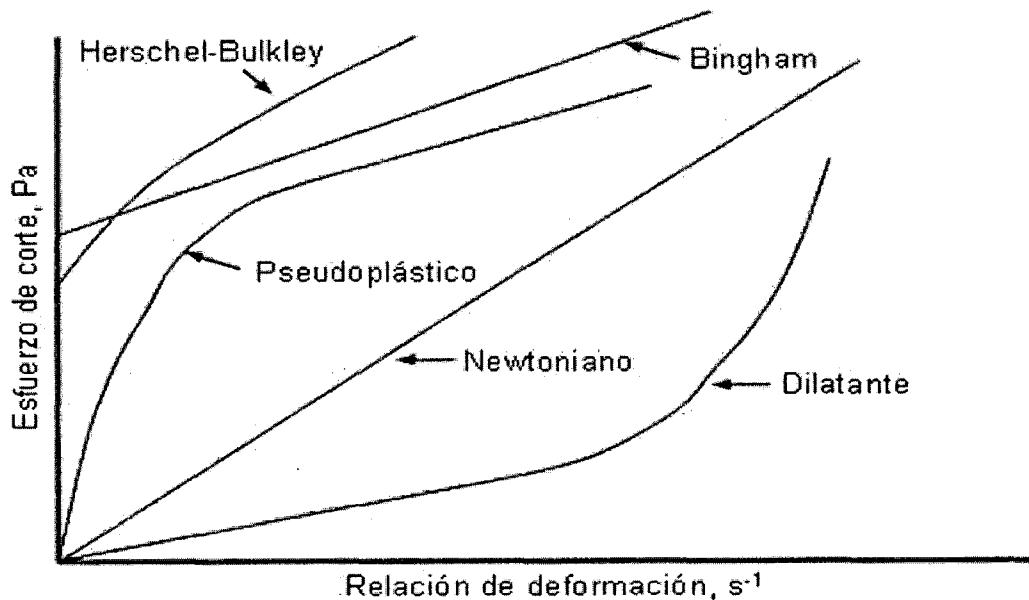


Figura 1.5: Reógrama de fluidos independientes del tiempo.

Fuente: Steffe, 1996

En referencia a lo anterior, se presentan los principales modelos reológicos de fluidos no newtonianos, usualmente aplicados para el estudio reológico en la industria alimentaria, los mismos que serán descritos a continuación:

❖ Modelo de Ley de la Potencia

Muchos fluidos alimenticios describen comportamiento pseudoplástico y son caracterizados utilizando un modelo de ley de potencia (Steffe; Holdsworth citados por Mukprasirt et al., 2000):

$$\sigma = K\gamma^n$$

(Ec. 3)

Dónde:

K = coeficiente de consistencia (Pa sⁿ)

n = índice de comportamiento reológico (adimensional), con 0 < n < 1

Al dividir la ecuación por la relación de deformación γ , se obtiene la ecuación que gobierna la viscosidad aparente en fluidos pseudoplásticos:

$$\eta = K\gamma^{n-1}$$

(Ec. 4)

Dónde: η es la viscosidad aparente, en Pa.s.

En este caso, la viscosidad aparente del fluido disminuye a medida que aumenta el esfuerzo de corte. Según Rha (1978), algunas causas atribuibles al comportamiento pseudoplástico son:

- a) Compuestos de alto peso molecular o partículas de gran tamaño
- b) Alta interacción entre las partículas, provocando agregación por enlaces secundarios
- c) Relación axial grande y asimetría de partículas, que requieren orientación a lo largo de la línea de flujo
- d) Variaciones en el tamaño y forma de las partículas que permiten el apilamiento de ellas
- e) Partículas en estado no rígido o flexible que pueden sufrir cambios geométricos o conformacionales

A continuación se citan ejemplos de fluidos pseudoplásticos: puré de plátano, vinagreta, jarabe de chocolate, salsa para enchilada, y jarabe para panqueque (Briggs y Steffe, 1997); jugos concentrados de frutas o vegetales, pastas, compota de manzana, pasta de almidón y proteínas (Rha, 1978). En general, los purés de frutas y vegetales son fluidos pseudoplásticos. La consistencia de estos productos es un parámetro importante de calidad (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999).

En la Ec. 4 el índice de comportamiento reológico n es mayor que la unidad ($1 < n < \infty$), el fluido es dilatante, lo cual corresponde al fenómeno inverso de la pseudoplasticidad, porque el fluido aumenta su viscosidad al aumentar la tasa de corte. Este tipo de flujo sólo se encuentra en líquidos que contienen una alta proporción de partículas rígidas insolubles en suspensión (Bourne, 1982). El comportamiento dilatante también es el resultado de factores similares a los listados anteriormente para un fluido pseudoplástico, sin embargo, la concentración y la variación en las formas del material juegan un papel aún más determinante en la dilatancia. Este fenómeno puede ser el resultado de partículas de variados tamaños y formas, estrechamente ajustadas y firmemente empaquetadas, de manera que el flujo llega a ser relativamente más difícil al incrementar la presión (Rha, 1978). Se citan como ejemplo algunos tipos de miel y soluciones de 40% de almidón de maíz crudo (Steffe, 1996).

❖ Modelo Cuerpo plástico de Bingham.

Estos cuerpos no se derraman bajo el efecto de su peso; necesitan que la presión sobrepase un umbral para que comience el flujo. Una vez que se ha sobrepasado este valor crítico, el fluido se comporta como newtoniano (Cheftel et al., 1983). Esto se expresa por:

$$\sigma = K\gamma + \sigma_0$$

(Ec. 5)

Dónde:

σ_0 = Es el esfuerzo cortante límite, por encima del cual se produce el derramamiento newtoniano.

Algunos ejemplos de fluidos alimentarios que presentan este comportamiento son: salsa de tomate, mayonesa, crema batida, clara de huevo batida y margarina (Bourne,

1982); condimentos tipo mostaza, mantequilla, salsa de chocolate y puré de patatas (Cheftel et al., 1983).

❖ **Modelo de Herschel – Bulkley.**

Este modelo es una relación general para describir el comportamiento de fluidos no - newtonianos:

$$\sigma = K\gamma^n + \sigma_0 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde $0 < n < \infty$, con $\sigma_0 > 0$

Ciertos alimentos que se ajustan al modelo de Herschel - Bulkley son pasta de pescado desmenuzado, pasta de pasas (Steffe, 1996); pastas basadas en harina de arroz (Mukprasirt et al., 2000); puré de banana, durazno, papaya y mango (Guerrero y Alzamora, citado por Akdogan y McHugh, 2000).

❖ **Modelo de Casson.**

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

Dónde:

$K_{0C}^2 = \tau_{0C}$ = Tensión de cizallamiento inicial

K_C = Viscosidad plástica de Casson

C. Fluidos No – newtonianos dependientes del tiempo.

Según Gonzales (2009), la viscosidad aparente varía no sólo con el esfuerzo de corte, sino que también, para un esfuerzo de corte constante, varían con el tiempo de duración de la relación de deformación, la figura 1.6, nos muestra la relación entre esfuerzo de corte (Pa) y el tiempo a relación de deformación constante (s), además de ello, los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo, se clasifican en dos: fluidos tixotrópicos, y fluidos reopécticos, ambos descritos en la presente sección.

❖ **Fluidos Tixotrópicos.**

Son aquellos cuya viscosidad disminuye con el tiempo manteniendo el esfuerzo de corte constante, por lo tanto, la viscosidad aparente depende no sólo de la relación de

deformación, sino también de la duración (tiempo) de la deformación. La estructura de estos fluidos es destruida debido al esfuerzo de corte aplicado, regenerándose dicha estructura cuando deja de actuar el esfuerzo de corte.

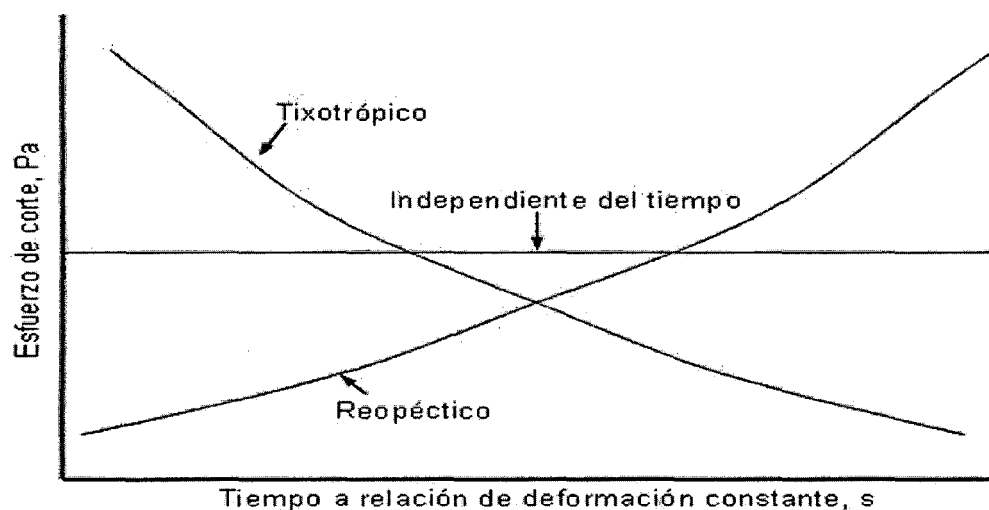


Figura 1.6: Comportamientos de fluidos dependientes del tiempo

Fuente: Steffe, 1996.

Cuando se recupera el valor de la viscosidad inicial se habla de tixotropía reversible, y si no se alcanza de nuevo el valor original, de tixotropía irreversible (ej. jugo concentrado de naranjas) llamada también reomalaxia o reodestrucción. Este fenómeno puede explicarse por la presencia entre las cadenas lineales de coloides hidrófilos, de enlaces hidrógeno que se rompen por la agitación y se reagrupan en el reposo (Steffe, 1996; Chefftel et al., 1983). Ejemplos típicos son los alimentos para niños basados en carne, vegetales, pescado, y postre de frutas (Alonso et al., 1995).

❖ Fluidos Reopépticos.

En estos fluidos la viscosidad aumenta con el tiempo, cuando el esfuerzo de corte permanece constante. Antitixotropía y tixotropía negativa son sinónimos de reopéxia. (Steffe, 1996). Este comportamiento implica la elaboración o reorganización de estructura, que trae consigo un aumento de la resistencia al flujo (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999).

1.3.2. Elementos de Reometría

La reometría se refiere al conjunto de técnicas experimentales utilizadas para determinar las propiedades del flujo de materiales (Ancey, 2005). Un reómetro es un

dispositivo que puede ejercer una fuerza sobre un material y medir con alta precisión la respuesta de este en el tiempo. Se expondrá a continuación en que consiste el tipo de curva reológica que se utiliza en este trabajo y las propiedades que se infieren de ella. Finalmente, se presentaran los principios básicos del reómetro de cilindros concéntricos utilizado en la presente investigación y como los resultados que esta entrega, fueron utilizados para extraer las propiedades reológicas de interés.

A. El Reómetro de Cilindros Concéntricos

Es un tipo de reómetro en el cual el fluido se ubica en el espacio anular ubicado entre dos cilindros concéntricos. El dispositivo utilizado es conocido como modelo Searle, en el cual el cilindro exterior está fijo, mientras que el interno puede rotar con velocidad angular Ω ejerciendo un torque M . A partir de sucesivas mediciones del tipo (Ω_i, M_i) es posible deducir a posteriori la curva reológica del fluido en estudio. Cabe mencionar que, junto con estos datos, en general el software propio de los reómetros modernos calcula internamente las duplas (γ_i, τ_i) y construye las curvas reológicas, sin embargo, suele no detallarse el procedimiento de cálculo, o bien, se utiliza la aproximación de fluido newtoniano que, como se verá más adelante, es un método deficiente para suspensiones concentradas (Oka, 1960):.

Con respecto a la dinámica del reómetro se hacen las siguientes suposiciones (Oka, 1960):

- i. El líquido es incompresible,
- ii. El régimen no es turbulento,
- iii. Las líneas de flujo son círculos en planos horizontales 0perpendiculares al eje de rotación,
- iv. El movimiento es estacionario,
- v. No hay movimiento relativo entre las paredes del cilindro y el fluido inmediatamente adyacente, y
- vi. El movimiento del fluido es el mismo en cada plano horizontal, esto es, el movimiento es bidimensional.

La suposición iii) corresponde a despreciar el efecto de fuerzas centrífugas que, tal como la suposición ii), es aceptable hasta cierto valor de Ω

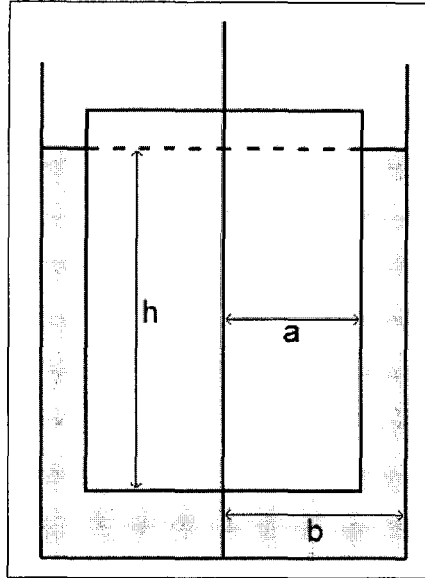


Figura 1.7: Reómetro de cilindros concéntricos

Fuente: Larenas, 2010

1.3.3. La Viscosidad

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

(Ec. 15)

Dónde:

τ : Esfuerzo cortante [mPa].

μ : Viscosidad [mPa.s]

γ : Velocidad de deformación [s^{-1}]

A. Influencia de la temperatura en la viscosidad

El valor de la viscosidad, que es una variable termodinámica, presenta también dependencia de la temperatura. En la industria la mayoría de las aplicaciones que utilizan fluidos acuosos trabajan a temperaturas entre 0 y 100 °C, los lubricantes y grasas se utilizan entre -50 y 300 °C, los polímeros fundidos entre 150 y 300 °C, y los vidrios fundidos se procesan por encima de 500 °C.

Las medidas de la viscosidad en el laboratorio se realizan a las temperaturas que más interesen para cada caso. No obstante, la fricción del líquido durante el ensayo

produce calor que debe ser disipado para que el calentamiento de la muestra no afecte a la medida (Riveiro, 2008).

En general para líquidos newtonianos, cuanto mayor es la viscosidad mayor es su dependencia de la temperatura. De modo que para obtener resultados precisos y fiables es necesario poner gran cuidado para limitar las oscilaciones térmicas durante el proceso de medida, para disoluciones acuosas es conveniente limitar las oscilaciones por debajo de ± 0.3 °C (Riveiro, 2008).

La viscosidad en líquidos de comportamiento newtoniano decrece con el aumento de la temperatura de acuerdo con la ley de Arrhenius (ecuación de Andrade):

$$\eta = Ae^{-B/T} \quad (\text{Ec. 16})$$

En la que T es la temperatura en grados Kelvin, A es un coeficiente característico del líquido, y el parámetro B está relacionado con la energía de activación del flujo a través de la constante de los gases perfectos:

$$B = \frac{E_a}{R} \quad (\text{Ec. 17})$$

Esta energía está relacionada con la conformación geométrica intermolecular del material que se somete a un esfuerzo cortante, por lo que puede ser un indicador de cambios de fase y modificaciones estructurales, ya sean éstas dependientes de la proporción de las sustancias que formen mezclas o disoluciones, de la temperatura, de la forma y longitud de las moléculas o asociaciones de ellas (Bezerra, 2000).

B. Influencia de la concentración en la viscosidad

El efecto de la concentración sobre la viscosidad aparente es importante en aplicaciones tales como la concentración de fluidos alimentarios: En rangos limitados de concentración, a una tasa de deformación y temperatura fijas, el efecto de la concentración de sólidos sobre la viscosidad aparente, puede ser descrito por relaciones tipo exponencial y de tipo potencial (Riveiro, 2008), conforme se describe en las ecuaciones a continuación:

$$\eta_a = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot C) \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\eta_a = a_0 \cdot C^{a_1}$$

(Ec. 19)

Dónde C es la concentración de sólidos solubles o totales, a_0 y a_1 son constantes a ser determinadas.

CAPITULO II:

MATERIALES Y METODOS

2.1. Generalidades

El presente trabajo se realizó en los laboratorios de procesos, ciencias y en las instalaciones de la “Planta Piloto de Procesamiento de Frutas” de la Escuela Académica de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, en los cuales se realizó una serie de experimentos descritos en el plan experimental; asimismo se contó con el apoyo de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, con los laboratorios de Ingeniería de Procesos de la Facultad de Ingeniería Química y, la Unidad de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas, donde se realizaron los análisis reológicos y químico proximal respectivamente.

2.2. Materiales

2.2.1. Materia prima

Para el estudio se utilizó frutos frescos de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), en estado fresco provenientes de la carretera Puerto Maldonado – Iñapari, Km. 2.1 margen izquierda, Localidad de “El Triunfo”, distrito de Las Piedras, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios.

2.2.2. Materiales de acondicionamiento del fruto

- ❖ Baldes 20 litros.
- ❖ Cuchillos de acero inoxidable.
- ❖ Balanza tipo Reloj marca “ROMA” (Cap. Máx. 10 kg.)
- ❖ Bolsas de alta densidad grado alimentario (polipropileno cap. 1 kg ;20x20 cm)

2.2.3. Materiales de laboratorio

- ❖ Vasos de precipitado 50, 100 ml.
- ❖ Pipetas graduadas 10 ml.
- ❖ Probeta 100 ml.
- ❖ pera de succión.
- ❖ Pipeteador automático

- ❖ Bagueta
- ❖ Papel filtro Whatman (N° 04)
- ❖ Matraz Erlenmeyer 500 ml
- ❖ Crisol de porcelana (Humedad)
- ❖ Balón de digestión 1000 ml (Proteínas)
- ❖ Picnómetro Vol. 10,071 ml. en 20 °C, marca MARIENFELD
- ❖ Matraz Kitasato, capacidad 500 ml.
- ❖ Embudo Büchner de 100 mm.
- ❖ Soporte Universal
- ❖ Fiolas de 10, 100, 500, 1000 ml

2.2.4. Equipos

- ❖ Pulpeadora 2HP, marca “A&C Ingenieros”
- ❖ Bomba de agua, marca Brookfield modelo TC 102
- ❖ Balanza digital: marca: Mettler Toledo, MT-SICS.
- ❖ Bomba de vacío, marca “1 STAGE”
- ❖ Balanza Analítica, marca HW Kessel
- ❖ Reómetro de cilindros concéntricos, marca Brookfield, modelo DVIII ULTRA
- ❖ Refractómetro de mesa ABBE Prisma
- ❖ Peachímetro, marca Mettler Toledo
- ❖ Estufa, marca Memmert
- ❖ Bomba de Agua, marca Brookfield.
- ❖ Equipo de destilación Soxhlet
- ❖ Digestor, marca Labof
- ❖ Mufla, marca Lindberg
- ❖ Equipo de destilación, proteínas
- ❖ Agitador mecánico, con regulador de velocidades.
- ❖ Mangueras de conexión para bomba de vacío.

2.2.5. Reactivos

- ❖ Hexano
- ❖ Hidróxido de sodio (0.1 N)
- ❖ Hidróxido de sodio (0.4 N)

- ❖ Hidróxido de sodio (1.25 %)
- ❖ Ácido clorhídrico 6.34 N.
- ❖ Éter etílico
- ❖ Éter de petróleo.
- ❖ Ácido sulfúrico (1.25 %)
- ❖ Ácido sulfúrico (0.1 N)
- ❖ Sulfato de cobre.
- ❖ Sulfato de potasio.
- ❖ Soda caustica (0.1 N)

2.3. Métodos

2.3.1. Métodos para Análisis Proximal

El análisis proximal de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), fue realizado en el laboratorio de análisis químico de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – UNSAAC, los análisis y sus respectivas normas se muestran en la tabla 2.1, a continuación:

Tabla 2.1: Análisis proximal de la pulpa de Copoazú y sus respectivas normas.

ANÁLISIS	NORMA
Humedad y Materia seca	NTP 206.011
Cenizas	AOAC 935.39B
Fibras	AOAC 935.39B
Carbohidratos	AOAC, 1995
Grasas	NTP 206.017
pH	AOAC, 973.41
Densidad	NTP 203.069
Solidos solubles	AOAC, 1995

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico de la UNSAAC, (2014).

2.3.2. Metodología

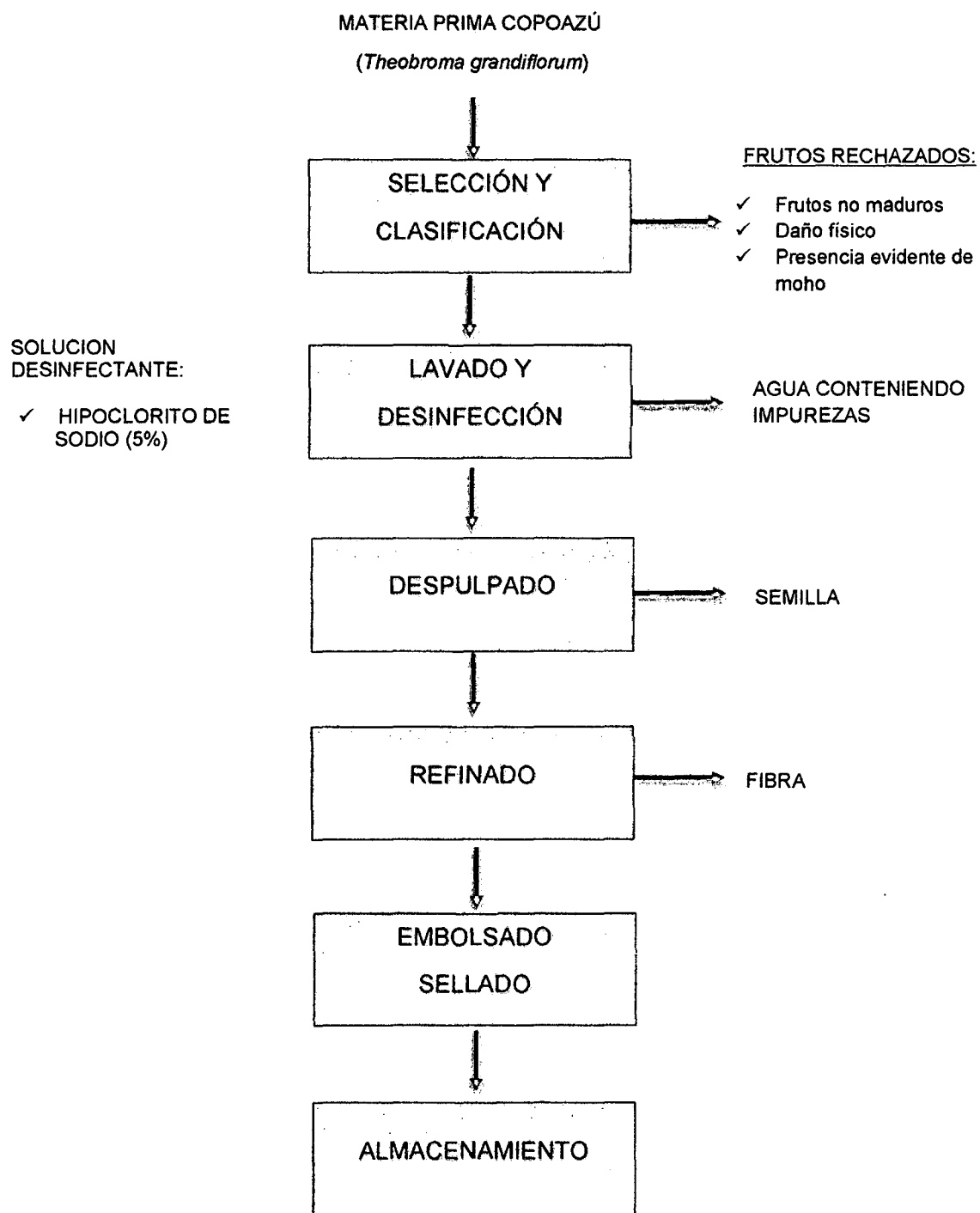


Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso para obtención de pulpa de Copoazú

Fuente: Elaboración propia (2015).

2.3.2.1. Descripción del proceso para obtención de pulpa de Copoazú

En este apartado se describen los procesos unitarios realizados para la obtención de la pulpa de Copoazú, a continuación:

- ❖ **Materia prima:** La materia prima será el fruto Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), completamente maduro y en buen estado para la investigación.

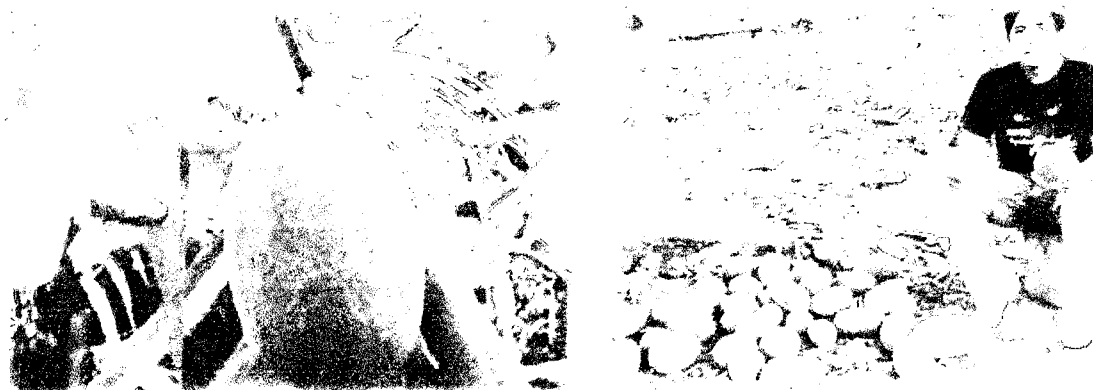


Figura 2.2: Recolección de materia prima Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

- ❖ **Selección y clasificación:** La selección consistió en separar toda materia prima que se encuentre en estado de deterioro ya sea por daños mecánicos, físicos o biológicos. Esta operación se llevara a cabo manualmente, en mesas de acero inoxidable.
- ❖ **Lavado y desinfección:** Los frutos de Copoazú se lavan mediante inmersión en agua con hipoclorito de sodio 0.5-1.0% durante 10 minutos. Posteriormente se enjuagan y se dejan escurrir .El principal objetivo es el de eliminar toda infección traída del campo.
- ❖ **Pulpeado:** Se realiza en una pulpeadora (malla con orificios de 2.9 mm de diámetro).Luego, la pulpa obtenida se refina (malla con orificios de 0.5 mm de diámetro), separando fibra y semilla.
- ❖ **Refinado:** La pulpa Copoazú obtenida a partir de la etapa anterior, es introducida en un molino coloidal en la cual se encarga de retirar los sólidos insolubles o fibras contenidas en la pulpa de Copoazú.

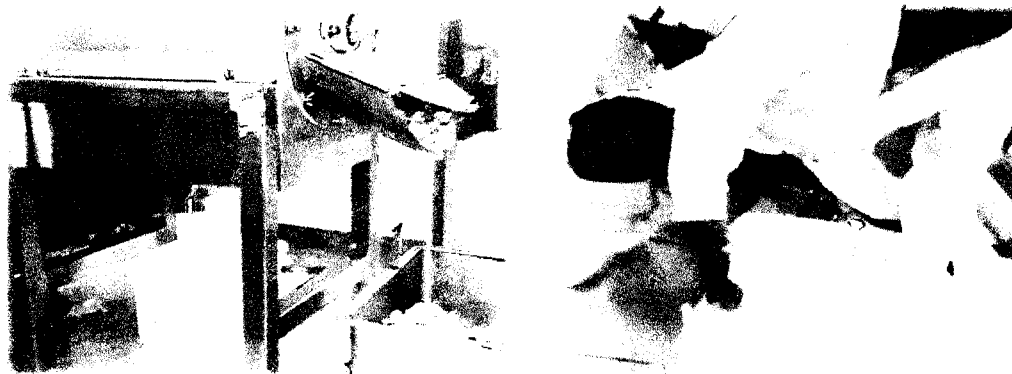


Figura 2.3: Despulpado de materia prima Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

- ❖ **Embolsado-sellado:** La pulpa de Copoazú son embolsado en bolsa de polipropileno con una capacidad aproximada de un 1 kg, para ser luego ser sellados.

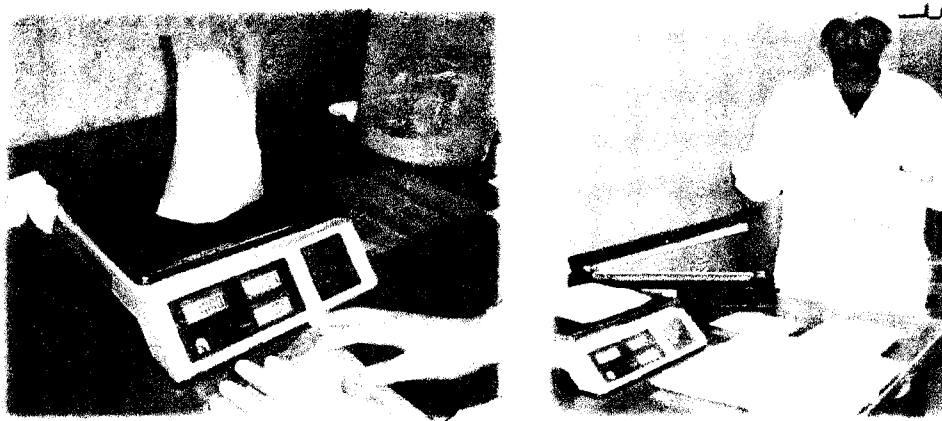


Figura 2.4: Embolsado y sellado de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

- ❖ **Almacenamiento:** Luego de culminado el proceso de obtención de pulpa de Copoazú, el producto será almacenado a temperatura de refrigeración de 5 °C, en un ambiente adecuado.

Asimismo, se detalla el procedimiento experimental desarrollado durante la investigación, a continuación:

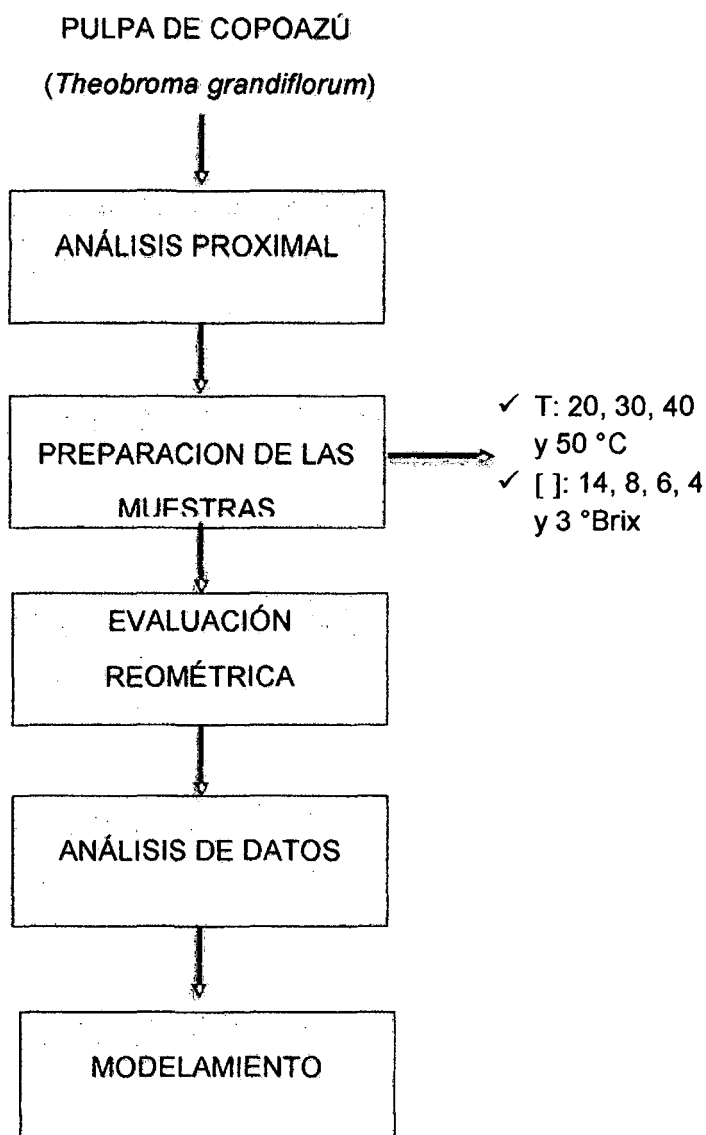


Figura 2.5: Diagrama de flujo del procedimiento experimental de la investigación

Fuente: Elaboración propia (2015).

2.3.2.2. Proceso de evaluación del comportamiento reológico.

- ❖ **Análisis proximal:** El análisis proximal de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), fue realizado en el laboratorio de análisis químico de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad San Antonio

Abad del Cusco – UNSAAC, los análisis realizados se presentaron en la sección 2.3.1 de este capítulo.

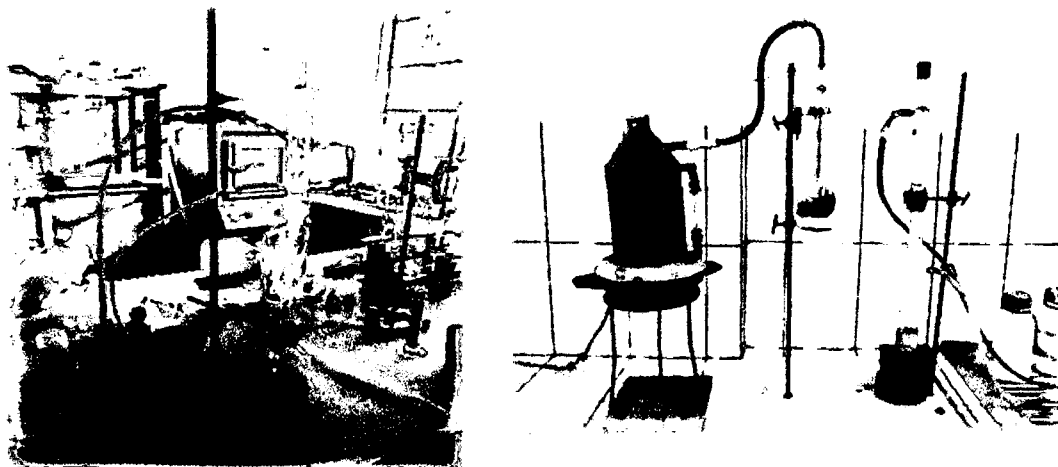


Figura 2.6: Análisis proximal de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Laboratorio de análisis UNSAAC, elaboración propia (2015)

- ❖ **Preparación de la muestras:** Se realizará el acondicionamiento de la muestra, previo a la medición reométrica, la muestras de pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), fueron homogenizadas a las siguientes concentraciones: 14, 8, 6, 4 y 3 °Brix, las cuales se prepararon por dilución con agua destilada a las concentraciones establecidas. Asimismo los tratamientos se realizaron a las siguientes temperaturas. 20, 30, 40 y 50 °C para cada una de las concentraciones.

A continuación se determinará el índice de refracción según la norma AOAC 1995, utilizando un refractómetro Abbe Prisma - CETI convexo. Seguidamente se procederá a la medida de su densidad, utilizando el método Picnométrico, vol. 5 ml a una temperatura de 20 °C. Finalmente se determinó el pH de las muestras para complementar los datos requeridos para el análisis.

- ❖ **Evaluación reométrica:** Para el desarrollo de las pruebas reológicas se realizó el siguiente procedimiento:
 1. Poner en funcionamiento el baño de temperatura constante y permitir que alcance y se mantengan los valores, previamente determinados, para los cuales se realizarán las mediciones reométricas. Dependiendo de la temperatura de trabajo, ajustar el termostato.

2. Limpiar perfectamente el accesorio ULA (localizador conjunto de canal, tubo de cámara, camisa de agua, spindle) y demás elementos del reómetro.
3. Instalar el spindle UL adapter (ULA) en el eje vertical correspondiente del reómetro, ajustándola con un movimiento en sentido anti – horario.

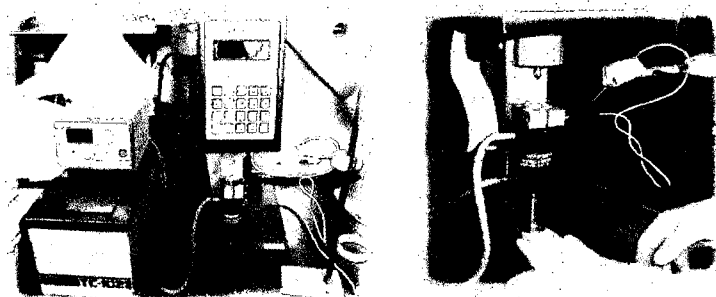


Figura 2.7: Reómetro Brookfield y accesorio UL adapter

Fuente: Laboratorio de análisis UNSAAC, elaboración propia (2015)

4. Superado el ítem anterior, establecer el programa de trabajo en el software del equipo (Rheocalc V 3.1-1), para cada muestra según los parámetros que se obtuvieron de la prueba – error durante el ensayo, la misma que considero los límites del programa en función al % torque, el cual comprendió $\Gamma = 10 - 100 \%$, los datos para la prueba error se muestran en la tabla 2.2.

A continuación se desarrollaron los programas reométricos para cada una de las muestras evaluadas, los cuales ingresados en el software del reómetro, el cual mediante la interfaz nos permitió la evaluación y la recolección de los datos que posteriormente fueron analizados y presentados en los resultados de esta investigación. En primer lugar, se presenta la tabla 2.2, la misma que contiene los parámetros de operación en revoluciones por minuto (RPM), según el % Torque para cada uno de los tratamientos analizados, a continuación:

Tabla 2.2 Prueba error: parámetros reológicos en función del % del Torque

ITEM	Concentración	Min (RPM)	Max (RPM)
Pulpa de Copoazú	14 °Brix	0,05	0,75
Dilución 1:1	8 °Brix	1	40
Dilución 1:2	6 °Brix	10	120
Dilución 1:3	4 °Brix	10	230
Dilución 1:4	3 °Brix	10	240

En segundo lugar, se presenta el programa reológico establecido en función del algoritmo brindado por el software Rheocalc, sobre el cual se establecieron los parámetros de operación para el análisis de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*), a continuación:

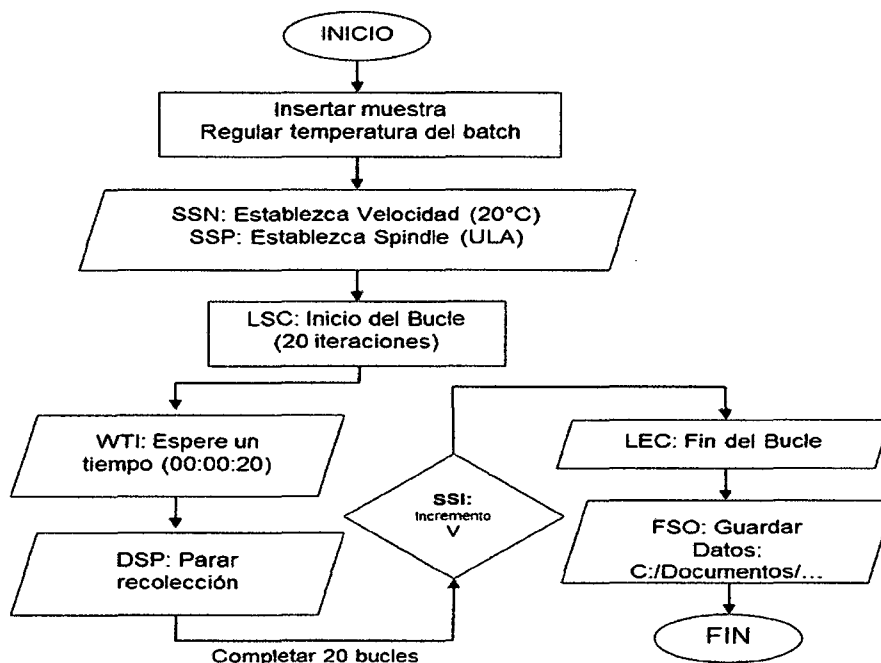


Figura 2.8: Programa de trabajo para estudio reométrico de la pulpa de Copoazú

Fuente: Elaboración propia (2015)

Finalmente se ejecuta el programa, el cual procederá con la evaluación y recolección de datos, la figura 2.6 presenta al interfaz del sistema Rheocalc V3.1-1, el cual permitió realizar el estudio reométrico, a continuación:

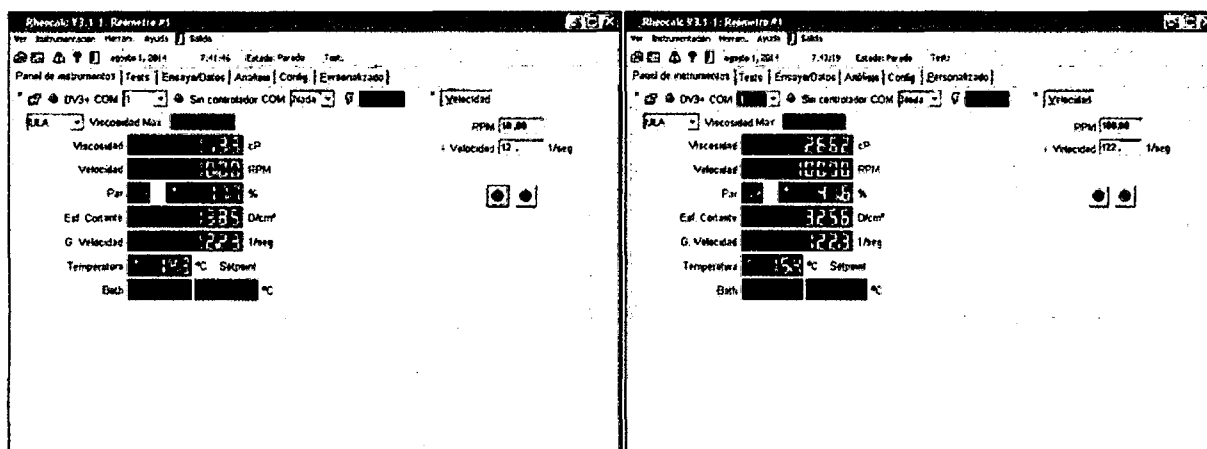


Figura 2.9: Interfaz del sistema Rheocalc V3.1-1

Fuente: Laboratorio de análisis UNSAAC (2015)

- ❖ **Análisis de datos:** Al finalizar las pruebas reológicas, se registraron todos los parámetros reológicos para cada tratamiento desarrollado, se obtuvieron datos de: viscosidad, gradiente de velocidad, esfuerzo cortante, % torque, habiendo para ello utilizado variables de concentración, temperatura y velocidad. A partir de estos valores será posible calcular la tasa de deformación y la tensión de cizallamiento, índice de comportamiento e índice de flujo para cada uno de los modelos reológicos comparados. El análisis de datos se realizó utilizando dos herramientas tecnológicas; para la sistematización y ordenamiento de los datos exportados se trabajó con Microsoft Excel 2010 y para el ajuste de los datos a modelos reológicos se utilizó Sigma Plot ver. 11.2, realizando el análisis de regresión como una prueba de homogeneidad de varianza (Test Levene) y normalidad de distribución del error (prueba de Kolmogorov-Smirnov), asimismo los criterios utilizados para la selección del mejor modelo fueron los siguientes:
- Coeficiente de determinación, R^2 .
 - Coeficiente de determinación Ajustado, $R^2_{Adj} > 0.8$.
 - χ^2 estadístico < 0.02
 - Suma de cuadrados del error, RMSE.

La exactitud de la correlación, evaluado por RMSE, se describe por:

$$RMSE = \left\{ \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n [estimated\ value(i) - observed\ value(i)]^2 \right\}}{n} \right\}^{1/2}$$

- ❖ **Modelamiento reológico:** Después de haber analizado los datos y ajustado a los modelos reológicos, se evaluó el comportamiento de las dos variables de implicancia en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú: temperatura y concentración. Finalmente, teniendo el modelo reológico con mejor ajuste al comportamiento del producto se realizó el modelamiento matemático en función de las variables de este modelo, considerando los respectivos: índice de comportamiento de flujo e índice de consistencia.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSION

En este apartado se presentan el análisis de los resultados del trabajo de campo a fin de satisfacer los objetivos planteados en la propuesta inicial, en una primera parte se presentan los resultados producto del análisis proximal practicado a las muestras de pulpa de Copoazú, la segunda etapa contiene los resultados registrados sobre el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, finalmente, la tercera sección contiene el modelamiento reológico para el producto a partir de los datos obtenidos en la etapa experimental.

3.1. Caracterización Físico – Química de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*)

A continuación se presentan los resultados de los análisis de la pulpa de Copoazú, donde el resultado de la media aritmética corresponde a tres replicas.

Tabla 3.1: Análisis proximal de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*)

Análisis	Resultados
Humedad (%)	84.79
Proteína (%)	0.85
Grasa (%)	0.02
Ceniza (%)	0.67
Carbohidratos (%)	13.67
Densidad (gr/cm ³)	1.0433±0.02

Fuente: Elaboración propia en UNSAAC (2014)

Los valores obtenidos para el análisis proximal de la pulpa de Copoazú presentados en el Cuadro 3.1, son similares a los valores referenciales mencionados en Pizarro et al., (2010).

3.2. Comportamiento reológico de la Pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*)

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del estudio reométrico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), los cuales se han estructurado según el plan experimental, la tabla 3.2 presenta dichos resultados

Tabla 3.2: Valores reológicos de la pulpa de Copoazú

N°	Viscosidad	Veloc.	Torque	Esf.Cortante		Gradiente	Temp.
	<i>cP</i>	<i>rpm</i>	%	<i>Dyn / cm²</i>	<i>N / m²</i>	<i>1 / s</i>	°C
1	29952.00	0.05	23.37	18.32	1.832	0.06	20.50
2	19072.00	0.10	29.84	23.33	2.333	0.12	20.40
3	16554.67	0.15	38.78	30.37	3.037	0.18	20.40
4	15328.00	0.20	47.86	37.49	3.749	0.24	20.33
5	14208.00	0.25	55.55	43.44	4.344	0.31	20.45
6	13632.00	0.30	63.90	50.02	5.002	0.37	20.28
7	13129.14	0.35	71.85	56.20	5.620	0.43	20.48
8	12752.00	0.40	79.74	62.38	6.238	0.49	20.20
9	12202.67	0.45	85.80	67.16	6.716	0.55	20.28
10	11609.60	0.50	90.72	70.99	7.099	0.61	20.18
11	11229.09	0.55	96.51	75.53	7.553	0.67	20.30

Fuente: Laboratorio de Reometría – UNSAAC, elaboración propia (2014).

Es necesario mencionar que, los datos presentados en la Tabla 3.2 fueron también obtenidos para las diferentes concentraciones (12, 8, 6, 4 y 3 ° Brix) y temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C), datos que, por su dimensión son presentados en el Anexo A de la presente investigación. Seguidamente, la figura 3.1 representa la tendencia de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) en función a las 04 temperaturas de estudio aplicadas, a continuación:

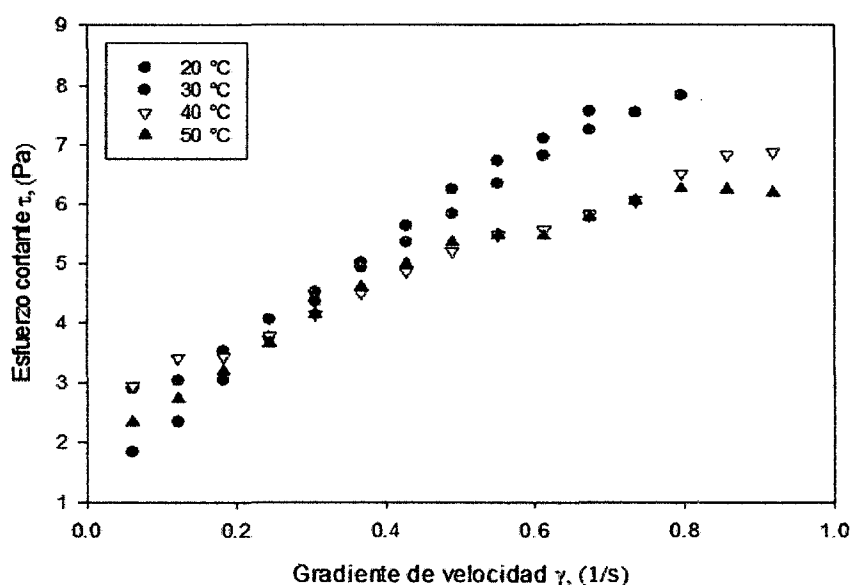


Figura 3.1: Relación entre esfuerzo cortante y gradiente de velocidad de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

En la figura 3.1 se puede apreciar la tendencia que presentó la pulpa de Copoazú a diferentes temperaturas, la relación entre el esfuerzo cortante y la gradiente de velocidad fue ascendente y proporcional, asimismo, el incremento de la temperatura generó una ligera reducción en los valores de esfuerzo cortante de entre 8 a 6 Pascales, en el caso de la gradiente de velocidad, esta aumentó en función que la temperatura se incrementó pasando de valores aproximados de 0,7 a 0,9 (1/seg).

Para el caso de la evaluación de la relación entre la viscosidad y la gradiente de velocidad, la figura 3.2 nos presenta la tendencia presentada para la pulpa de Copoazú a diferentes temperaturas, a continuación:

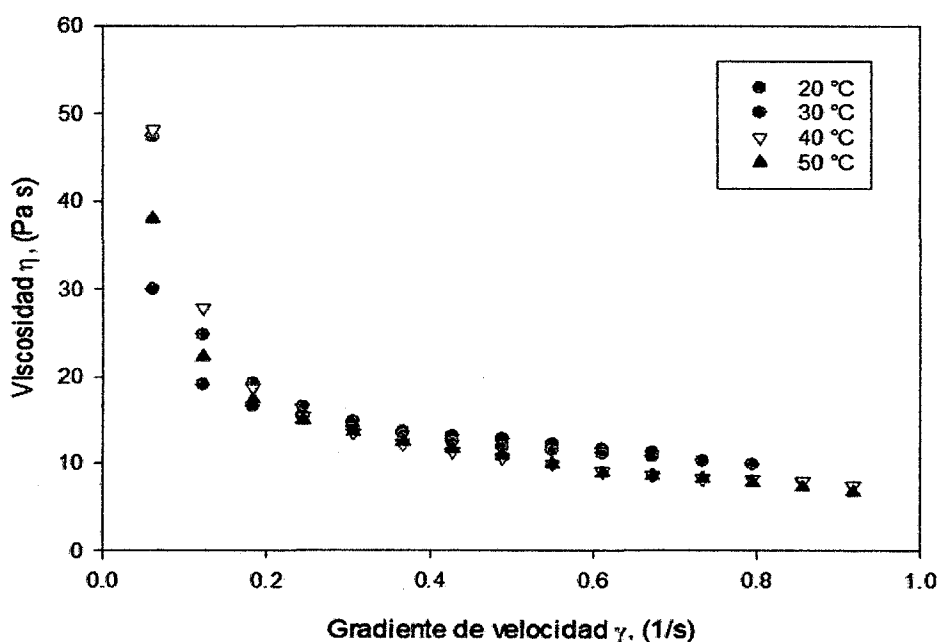


Figura 3.2: Relación entre la viscosidad y gradiente de deformación para la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

Es importante también mencionar que, los datos presentados en las figuras 3.1 y 3.2 fueron elaborados también para las diferentes concentraciones (12, 8, 6, 4 y 3 ° Brix) y temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C), datos que, por su dimensión son presentados en el Anexo B de la presente investigación. El gráfico 3.2 representa la tendencia de los fluidos pseudoplásticos, el descenso de los valores de viscosidad a medida que se incrementa la gradiente de velocidad, esto en función del incremento de la temperatura, como es el caso del tratamiento de pulpa de Copoazú a 50 °C, el cual

presentó los valores más bajos de viscosidad –alrededor de 0.5 (Pa.sec) para una gradiente de velocidad cercana a la unidad (1/seg).

Por otro lado, las tablas que van a continuación, contienen los parámetros de los cuatro modelos utilizados para los ajustes de los datos experimentales: **Ley de la Potencia**, **Bingham**, **Herschel & Bulkley** y **Casson**; y sus respectivos índices de ajuste. En primer lugar se presenta en la Tabla 3.3 los parámetros del modelo de Ley de la Potencia, para las diferentes concentraciones de pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), a continuación:

Tabla 3.3: Parámetros del modelo de Ley de la Potencia para la pulpa de Copoazú.

SST* (°Brix)	Temperatura t (°C)	Índice de Consistencia K (Pa s ⁿ)	Índice de Fluidez n	R ² _{Adj}
14	20	9.4787±0.015	0.6296±0.025	0.98479
	30	8.0865±0.018	0.4346±0.032	0.93734
	40	6.6567±0.012	0.3375±0.023	0.93978
	50	6.7457±0.008	0.4048±0.015	0.98215
8	20	0.2477±0.067	0.5516±0.033	0.95174
	30	0.5438±0.039	0.6316±0.030	0.97213
	40	1.2171±0.042	0.4381±0.030	0.97196
6	20	0.2199±0.028	0.4963±0.015	0.99132
	30	0.1884±0.036	0.5014±0.019	0.9856
	40	0.2197±0.039	0.4211±0.020	0.97706
	50	0.2334±0.030	0.3853±0.016	0.98558
4	20	0.2000±0.030	0.4672±0.014	0.99111
	30	0.0221±0.063	0.7680±0.028	0.99109
	40	0.0393±0.101	0.6226±0.044	0.97103
	50	0.0260±0.068	0.6931±0.029	0.98924
3	20	0.1368±0.056	0.4645±0.026	0.9733
	30	0.0666±0.051	0.5667±0.023	0.98873
	40	0.1311±0.095	0.4045±0.043	0.91581
	50	0.1121±0.058	0.4121±0.025	0.9812

Fuente: Laboratorio de Reometría – UNSAAC, elaboración propia (2014).

La tabla 3.3 presenta los parámetros de comportamiento ajustados al modelo de Ley de la Potencia, la misma que considera el índice de consistencia e índice de fluidez (comportamiento de flujo) con su respectivo coeficiente de determinación ajustado

(R^2_{Ad}), para cada uno de los tratamientos. Asimismo, la Tabla 3.4 presenta los parámetros del modelo de Bingham, para las diferentes concentraciones de pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), a continuación:

Tabla 3.4: Parámetros del modelo de Bingham, para la pulpa de Copoazú a diferentes concentraciones.

SST (°Brix)	Temperatura t (°C)	Tensión Inicial τ_0 (Pa)	Viscosidad plástica μ_{pl} (Pa s)	R^2_{Adj}
14	20	1.3221±0.102	9.6582±0.245	0.99358
	30	2.2997±0.063	7.1771±0.129	0.99612
	40	2.7253±0.064	4.6894±0.115	0.99158
	50	2.5379±0.198	4.6725±0.356	0.92458
8	20	1.4678±0.314	0.0146±0.002	0.78651
	30	1.4773±0.333	0.0963±0.011	0.84589
	40	2.6438±0.219	0.0897±0.008	0.95466
	50	1.4550±0.383	0.1360±0.013	0.92745
6	20	0.8928±0.060	0.0123±0.001	0.97327
	30	0.7843±0.064	0.0107±0.001	0.96093
	40	0.7611±0.052	0.0073±0.001	0.9461
	50	0.7669±0.031	0.0059±0.000	0.97381
4	20	0.9736±0.058	0.0068±0.000	0.97722
	30	0.2931±0.043	0.0050±0.000	0.98761
	40	0.3765±0.038	0.0034±0.000	0.98353
	50	0.2972±0.020	0.0036±0.000	0.99588
3	20	0.6935±0.018	0.0045±0.000	0.99582
	30	0.5088±0.021	0.0041±0.000	0.99524
	40	0.5493±0.035	0.0028±0.000	0.96373
	50	0.3133±0.092	0.0028±0.000	0.90835

Fuente: Laboratorio de Reometría – UNSAAC, elaboración propia (2014).

A continuación se presentan los parámetros del modelo de Herschel & Bulkley, para las diferentes concentraciones de pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), la Tabla 3.5 los presenta, a continuación:

Tabla 3.5: Parámetros del modelo de Herschel & Bulkley, para la pulpa de Copoazú a diferentes concentraciones.

(°Brix)	t, (°C)	τ_0 , (Pa)	K (Pa s ⁿ)	n	R ² _{Adj}
14	20	0.6951±0.257	9.6207±0.177	0.8086±0.061	0.99678
	30	2.2742±0.165	7.1809±0.137	0.9888±0.066	0.99575
	40	2.5359±0.175	4.7927±0.149	0.8980±0.079	0.99198
	50	0.0000±0.014	6.8477±0.131	0.3918±0.127	0.97008
8	20	0.0000±0.058	0.3991±0.022	0.4533±0.083	0.91225
	30	0.0000±0.080	0.8473±0.015	0.4973±0.049	0.95255
	40	0.2344±0.455	1.0808±0.267	0.4599±0.464	0.95501
	50	0.0000±0.000	0.6416±0.125	0.6406±0.056	0.96145
6	20	0.0014±0.522	0.2198±0.202	0.4963±0.146	0.9872
	30	0.0000±0.220	0.1942±0.079	0.4946±0.064	0.9838
	40	0.0000±0.609	0.2313±0.295	0.4096±0.191	0.9778
	50	0.0575±0.628	0.2059±0.300	0.4032±0.212	0.9847
4	20	0.2353±0.298	0.1215±0.081	0.5416±0.099	0.9925
	30	0.0000±0.025	0.0239±0.026	0.7532±0.171	0.9905
	40	0.3698±0.039	0.0036±0.013	0.9900±0.568	0.9791
	50	0.2900±0.028	0.0038±0.007	0.9900±0.028	0.9947
3	20	0.6869±0.080	0.0047±0.003	0.9900±0.116	0.9952
	30	0.5018±0.140	0.0044±0.006	0.9900±0.026	0.9942
	40	0.5451±0.094	0.0030±0.008	0.9900±0.049	0.957
	50	0.5230±0.040	0.0036±0.016	0.9195±0.078	0.9722

Fuente: Laboratorio de Reometría – UNSAAC, elaboración propia (2014).

Finalmente, se presentan los parámetros reológicos del modelo de Casson, para las diferentes concentraciones de pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), en la Tabla 3.6 se puede apreciar lo indicado en esta sección:

Tabla 3.6: Parámetros del modelo de Casson, para la pulpa de Copoazú a diferentes concentraciones.

(°Brix)	t (°C)	τ_0	K_C (Pa s)	R^2_{Adj}
14	20	0.4581±0.046	6.5432±0.262	0.9967
	30	1.1778±0.094	3.6967±0.235	0.9893
	40	1.7135±0.084	1.8710±0.118	0.9874
	50	1.5477±0.147	1.9568±0.221	0.9619
8	20	0.9343±0.207	0.0064±0.001	0.8897
	30	0.7949±0.221	0.0501±0.010	0.9106
	40	1.5000±0.211	0.0398±0.007	0.9622
	50	0.5484±0.216	0.0881±0.016	0.9491
6	20	0.4582±0.043	0.0062±0.001	0.9846
	30	0.4037±0.046	0.0054±0.001	0.9792
	40	0.4542±0.043	0.0031±0.000	0.9679
	50	0.4749±0.029	0.0023±0.000	0.9837
4	20	0.5230±0.037	0.0033±0.000	0.9902
	30	0.0733±0.019	0.0037±0.000	0.9901
	40	0.1340±0.030	0.0022±0.000	0.979
	50	0.0871±0.014	0.0025±0.000	0.9941
3	20	0.3583±0.023	0.0022±0.000	0.9922
	30	0.2153±0.020	0.0024±0.000	0.9935
	40	0.3101±0.046	0.0013±0.000	0.9448
	50	0.3269±0.033	0.0009±0.000	0.9787

Fuente: Laboratorio de Reometría – UNSAAC, elaboración propia (2014).

Comparando los parámetros estadísticos de los ajustes para los cuatro modelos (Tablas 3.3 – 3.6), se observa que el modelo de Herschel – Bulkley proporcionó los mejores ajustes en todos los niveles de temperatura y concentración estudiados, presentando los mayores valores para el coeficiente de determinación (R^2), que en promedio fue de 0,97724. En seguida, el modelo de Ley de La Potencia presentó los valores próximos con 0.97252, a continuación el modelo de Casson presentó los valores de 0.97125 y, por último el modelo de Bingham presentó valores de 0.95409;

Pereira et al., (2002) describió un comportamiento similar para los parámetros estudiados.

El parámetro K_c del modelo de Casson (Tabla 3.6) sufrió efectos de la temperatura, disminuyendo con el aumento de esta. Concepción (2000) y Bezerra (2000) describieron un comportamiento similar para este parámetro, cuando trabajaron, primero con pulpa de Guayaba y segundo con pulpa de Mango.

Los índices de consistencia K , K_H y K_C , de los modelos reológicos decrecieron con el aumento de temperatura, llegando, para el caso de K_H a disminuir hasta un 55% entre las temperaturas de 20°C y 50°C. Este comportamiento también fue relatado por Ibarz et al. (1994) estudiando el jugo de Naranja, Vitali et al. (1974) describió un comportamiento semejante para el jugo de Maracuyá, se asume que dicho comportamiento se describe por el comportamiento pseudo plástico del fluido y la relación proporcional entre el incremento de la temperatura y el índice de consistencia del fluido, que determina su comportamiento dilatante al pasar el umbral de temperatura ambiente.

3.3. Efecto de la temperatura y la concentración.

En esta sección se evaluó la influencia de la temperatura y la concentración en los parámetros reológicos establecidos para el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), el índice de consistencia en función de la temperatura es presentado a través de la siguiente ecuación:

$$K = K_o \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

Ec. (a)

Aplicando la función logaritmo natural en la ecuación (a), se tiene:

$$\ln(K) = \ln(K_T) + \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T}$$

Ec. (b)

Asimismo, el factor de frecuencia y el valor de la energía de activación (E_a) para cada una de las concentraciones se presentan en la tabla 3.7, a continuación:

Tabla 3.7: Variables de estudio para el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú

°Brix	Factor Frecuencia K_0 (kJ/mol)	Energía Activación, E_a (kJ/mol)	$ R^2_{Adj}$
14	0.17320143	9699.85177	0.83
8	0.00256371	13723.0061	0.8439
6	4.7913E-07	33096.0435	0.8169
4	3.4162E-12	60730.3735	0.9511
3	1.0101E-08	40002.5769	0.8791

Fuente: Elaboración propia (2015)

Reemplazando los valores del factor de frecuencia y energía de activación, datos para la pulpa de Copoazú (14 °Brix), en la ecuación (b), se tiene que:

$$K = 0.1732 \exp\left(\frac{3980.5346}{T}\right)$$

Ec. (c)

Por otro lado, la viscosidad aparente para fluidos no newtonianos establece que:

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= f(T, \dot{\gamma}_{rz}) \\ \eta_{app} &= f(T, \dot{\gamma}_{rz}) \end{aligned}$$

Ec. (d)

A continuación, el índice de comportamiento de flujo para cada tratamiento, es presentando en la tabla 3.8, en función a ello, y reemplazando (c) en (d), se tiene que:

$$\tau_{rz} = 0.1732 \exp\left(\frac{3980.534}{T}\right) \dot{\gamma}^{0.4516}$$

Tabla 3.8: Índice de comportamiento de flujo para la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

°Brix	\bar{n}
14	0.4516±0.063
8	0.5920±0.065
6	0.4510±0.029
4	0.6377±0.064
3	0.4619±0.037

Fuente: Elaboración propia (2015)

Entonces, la ecuación que refleja el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*), es:

$$\eta_{app} = 0.1732 \exp\left(\frac{3980.534}{T}\right) \dot{\gamma}^{(0.4516-1)}$$

Finalmente, en esta etapa se obtuvo un modelo matemático que describe el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, obteniendo un modelo matemático para aproximar los valores del índice de comportamiento de flujo de la pulpa de Copoazú, mediante un ajuste lineal de los datos de viscosidad aparente a una ecuación de Arrhenius, obteniéndose los valores de energía de activación de la pulpa de Copoazú, en función a sus diferentes concentraciones de estudio, una investigación similar desarrollada por Ferreira et al., 2002 presentó valores entre 0,393 y 0,627 al estudiar la pulpa de Guayaba, en forma general se puede asumir que a mayor energía de activación (E_a) existe una mayor dependencia de viscosidad aparente y del índice de comportamiento de flujo (n_a) con la temperatura, osea mayor variación de n_a y K_H con la temperatura para una concentración dada.

Por otro lado, la relación entre el índice de consistencia (K) y la temperatura (T), tiene un comportamiento inusual, tal como fue descrito por Peneirada, Maria, & Figueirêdo, (2002), a medida que la temperatura se incrementa, el índice de consistencia disminuye, demostrando un comportamiento pseudoplástico a 20 °C y dilatante en

temperaturas mayores a 30 °C, esta tendencia se puede apreciar en la figura 3.3, a continuación:

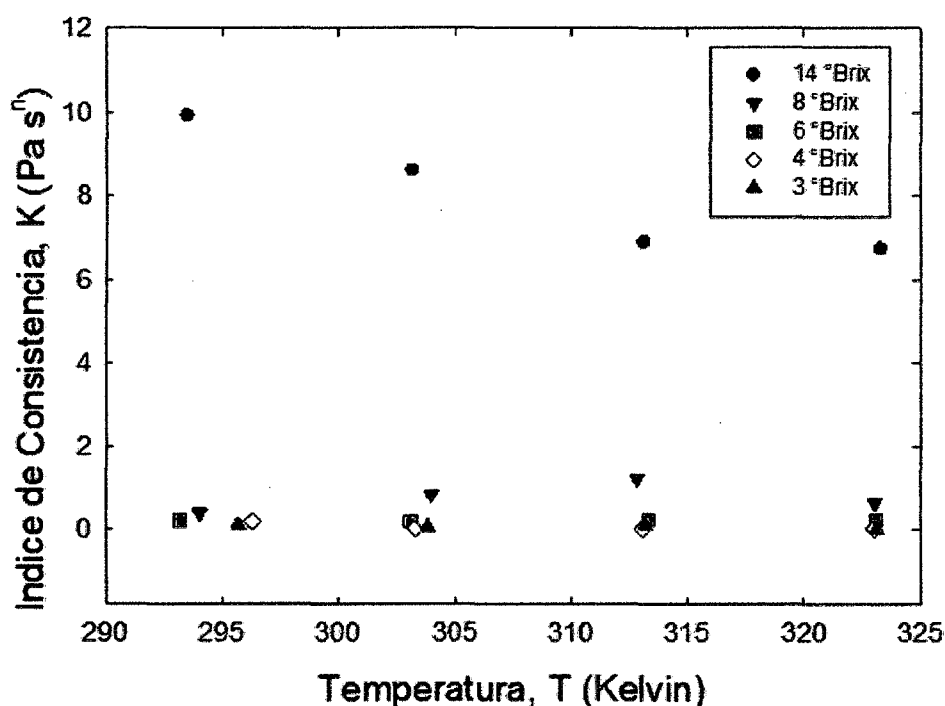


Figura 3.3: Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

El efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, descrito en el gráfico anterior, demuestra que existe un descenso de los valores para el índice de consistencia, en función del incremento de la temperatura a condiciones normales para la pulpa de Copoazú, la misma que corresponde a la concentración de 14 °Brix. Además de ello, las demás concentraciones presentaron comportamientos similares, en función a la similitud de los tratamientos practicados a cada una de las concentraciones.

De la misma forma, se evaluó la influencia de la concentración en los parámetros reológicos establecidos para el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), el índice de consistencia en función de la concentración se puede expresar de dos formas, potencial y exponencial, la forma potencia es modelada a continuación:

$$K = K_1 C^{\eta_1}$$

Ec. (e)

Aplicando la función logarítmica, se tiene que:

$$\log(K) = \log(K_1) + \eta_1 \log(C)$$

Ec. (f)

En referencia a lo anterior, el índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo obtenido en la etapa de evaluación reométrica se presenta en la tabla 3.9, a continuación:

Tabla 3.9: Variables de estudio para el efecto de la concentración en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú

Temp. t (°C)	K1	n1	R2Adj
20	0.0049694	2.6786	0.909
30	0.0012715	3.1134	0.903
40	0.0004742	3.4510	0.926
50	0.0002893	3.6402	0.910

Fuente: Elaboración propia (2015).

Finalmente, reemplazamos (f) en (e), entonces se tiene que:

$$K = 0.00497 (C)^{2.679}$$

Por otro lado, el comportamiento exponencial que describe el efecto de la concentración en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*), se describe mediante la siguiente ecuación:

$$K = K_2 \exp(\eta_2 C)$$

Ec. (g)

Aplicando la función logarítmica, se tiene que:

$$\ln(K) = \ln(K_2) + \eta_2 C$$

Ec. (h)

Entonces, reemplazando (g) en (h), se tiene que:

$$K = 0.0425 \exp(0.382 C)$$

En referencia a lo anterior, la figura 3.4. presenta el efecto de la concentración en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, a continuación:

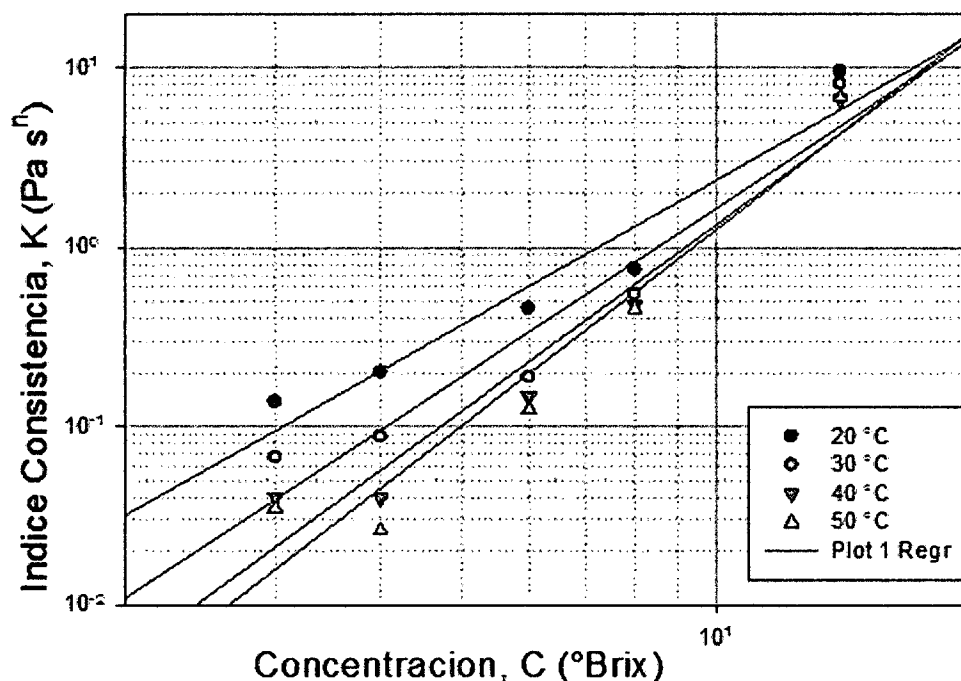


Figura 3.4: Efecto de la concentración en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)

Fuente: Elaboración propia (2015)

Por último, la relación entre el índice de consistencia (K) y la concentración (C), tal como fue descrito por Peneirada, Maria, & Figueirêdo, (2002), quien evaluó los efectos de la temperatura y la concentración, estableciendo que, a medida que la concentración aumenta, el índice de consistencia también incrementa, motivo por el cual, la relación entre el índice de consistencia y la concentración presentó una relación potencial, dicho comportamiento descrito perfectamente por los modelos reológicos para fluidos no newtonianos reflejando los datos procesados y expuestos en la figura anterior.

3.4. Modelamiento reológico de la pulpa de Copoazú

El modelo de Herschel - Bulkley es el que mejor ajusta el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), lo que nos permite establecer, en función al modelo Herschel – Bulkley, un modelo matemático que describa el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, de la siguiente manera:

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K_H (\dot{\gamma}_{yz})^n$$

$$\eta_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_{yx}} + K_H (\dot{\gamma}_{yz})^{n-1}$$

El modelo matemático de comportamiento reológico para la pulpa de Copoazú:

$$\tau_{yx} = 0.695 + 9.62(\dot{\gamma}_{yz})^{0.80}$$

A continuación se presenta una descripción gráfica del modelo:

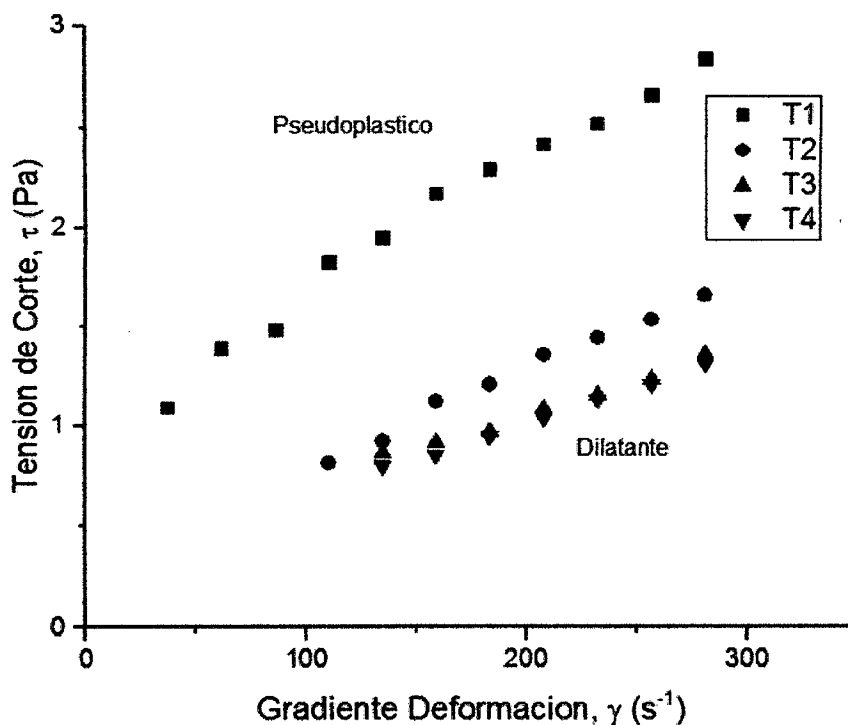


Figura 3.5: Comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú

Fuente: Elaboración propia (2015)

La figura 3.5 describe el comportamiento mediante un reógrama que estructura los parámetros principales de medición reológica y describe la reometría de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), que fue establecida se ajusta al modelo de Herschel & Bulkley, con respecto a ello Peneirada et al. (2002) describieron un comportamiento similar, llegando a obtener valores experimentales similares, verificando la posición relativa de las curvas, la reducción de las viscosidades aparentes con el incremento de la temperatura, confirmando el comportamiento pseudo plástico de la pulpa, además de ello y, gracias a los valores obtenidos en su respectivo coeficiente de determinación $R^2_{Adj} > 0.97$, es que se establece el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú en función a los modelos teóricos y con un modelo matemático para el caso en particular.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los modelos reológicos de Ley de la Potencia y Casson proporcionaron un buen ajuste a los datos experimentales, sin embargo, los mejores parámetros estadísticos de ajuste fueron obtenidos con el modelo reológico de Herschel – Bulkley, el cual describió el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), obteniendo un coeficiente de determinación promedio superior a $R^2_{Adj} > 0.97$, siendo así el modelo reológico que describe el comportamiento del producto reflejando la relación funcional entre la tensión de cizallamiento y el desplazamiento del fluido en función de las temperaturas (20, 30, 40 y 50 °C) y la concentración (14, 8, 6, 4 y 3 °Brix).

Los índices de comportamiento de flujo determinado a través de los modelos reológicos de Ley de la Potencia y Herschel – Bulkley presentaron valores menores que la unidad, caracterizando a la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) estudiada como un fluido no newtoniano con características pseudoplásticas a temperatura ambiente (20°C), el mismo que a temperaturas mayores (como las son en el caso de estudio 30, 40 y 50 °C) evidenció un comportamiento dilatante.

En segundo lugar, se determinaron las propiedades físico – químicas de la pulpa de Copoazú, valores que se aproximan a los valores referenciales obtenidos por Villachica (1996) e INIAP (2008), siendo relevante el porcentaje de humedad, el mismo que ascendió a 84,79 % y la presencia de Carbohidratos con 13, 86% de la pulpa de Copoazú (*T. grandiflorum*).

En tercer lugar, se logró realizar el estudio reométrico de la pulpa de Copoazú, desarrollando un programa de evaluación para cada tratamiento, incluyendo las dos variables, temperatura y concentración, siendo asistidos por el equipo – reómetro Brookfield DV-III, y la interfaz Rheocalc V.3.1-1 para la obtención de los datos reométricos.

Por otro lado, se logró evaluar el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, sobre el cual se concluye que a medida que la temperatura se incrementa, el índice de consistencia (K) disminuye, esto en relación al comportamiento pseudoplástico del fluido, finalmente se obtuvo la ecuación que modela el efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*):

$$\eta_{app} = 0.1732 \exp\left(\frac{3980.534}{T}\right) \dot{\gamma}^{(0.4516-1)}$$

Asimismo, se evaluó el efecto de la concentración en el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú, del cual se desprende una relación proporcional directa entre el índice de consistencia y a concentración, reflejando valores aproximados a 10 (Pa.sn) para concentraciones de 14 °Brix, definido por la siguiente ecuación:

$$K = 0.00497 (C)^{2.679}$$

Finalmente se consiguió un modelo matemático que describa el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), ajustado al modelo de Herschel – Bulkley, el cual se estructuró en función a los parámetros reológicos obtenidos en la fase experimental y presentada en la sección de resultados, el modelo se define por la siguiente ecuación:

$$\tau_{yx} = 0.695 + 9.62 (\dot{\gamma}_{yz})^{0.80}$$

A partir de todo lo concluido, se nos permite proponer futuras investigaciones orientadas a profundizar el uso de más variables que respondan desde otra perspectiva el comportamiento reológico de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), el efecto de todas las variables reométricas descritas en la presente investigación y su efecto sobre los componentes de la pulpa de Copoazú, como son proteínas y azúcares reductores, en función de la micro estructura del producto, y su influencia a nivel industrial. Por otro lado, se recomienda realizar investigaciones que evalúen el comportamiento de productos ya existentes en el mercado, los cuales en fase de escalamiento industrial, requieren de la información contenida en la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA


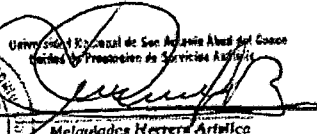

1. Alcázar Del Castillo, Jorge. 2002. Diccionario Técnico de Industrias Alimentarias. Cusco – Perú.
2. Agapito Francia, Teodoro, 1996. Factores de conversión. Lima – Perú.
3. Alonso, M.L.; Larrodé; O. y Zapico, J. 1995. Rheological behaviour of infant foods. *Journal of Texture Studies* 26: 193-202.
4. Akdogan, H.yMcHugh, T.H. 2000. Flow characterization of peach products during extrusion. *Journal of Food Science* 65(3): 471-475.
5. Bourne, M.C. 1982. Food texture and viscosity: concept and measurement. New York : Academic Press. 325 p.
6. Briggs, J.L. y Steffe, J.F. 1997. Using Bookfield data and the Mitschka method to evaluate power law foods. *Journal of Texture Studies* 28: 517-522.
7. Cheftel, J. C., Cheftel, H. y Besacon, P. 1983. Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Zaragoza: Acribia. pp.47-80.
8. Chirif, Alberto: Biodiversidad Amazónica y Gastronomía Regional. Artículo publicado en *Folia Amazónica*, revista del IIAP. Año 2006, vol. 12. Iquitos, 2005.
9. Cruz, F.A. 1996. Determinación de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de las semillas de copoazú (*Theobroma grandiflorum* Wild ex Spreng Schum) y obtención de pasta de copoazú. Convenio Instituto SINCHI-Universidad Nacional de Colombia-ICTA. Facultad de Ingeniería Agronómica. Tesis de pregrado. 86p.
10. Ferreira, G. M., De Melo, J., Silvestre, R., & Gasparetto, C. A. (2002). Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. *Revista de Ciências Exatas E Naturais*, 4(pQ 45).
11. González, S. 2009. Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos. Tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial. Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
12. Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. V.1999. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania-USA. pp. 85-204.
13. Instituto Boliviano de Comercio Exterior, IBCE. (2010). COPOAZÚ Y

- ACHACHAIRÚ. Perfil de mercado., 21.
14. INIAP, 2009, "Potencial nutritivo, funcional y procesamiento de tres frutales amazónicos", plegable N. 301, Quito, Ecuador.
 15. Hernández, M.S y Galvis, J.A. 1994. Análisis del crecimiento del fruto y determinación del momento de cosecha del copoazú (*Theobroma grandiflorum*). Colombia Amazónica Vol 7 (1-2):157-168.
 16. Larenas, M. (2010). Modelos en reología y aplicaciones a fluidos. Universidad de Chile.
 17. Matissek Reinhard, Schnepel Frank – M. Steiner Gabriele. (1998). Análisis de Alimentos, fundamentos, métodos y aplicaciones. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
 18. Mukprasirt, A., Herald, T.J., y Flores, R.A. 2000. Rheological characterization of rice flour-based batters. *Journal of Food Science* 65(7): 1194-1199.
 19. M. Krieger and S.H. Maron, Direct Determination of the Flow Curves of Non-Newtonian Fluids., *Journal of Applied Physics* 23 (1951), no. 1, 147–149. 14
 20. Novoa, D., & Ramírez, J. (2012). Caracterización reológica del manjar blanco del Valle del Cauca, 54–62.
 21. Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. (1999). Copoasu [*Theobroma grandiflorum*]: Cultivo y utilización.
 22. Peneirada, S., Maria, R., & Figueirêdo, F. De. (2002). COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum* Schum.) PENEIRADA 1. *Revista Brasileira de Productos Agroindustriales*, 37–40.
 23. Pizarro, R. D. A., Gallo, R. T., Montes, E. J. M., Sierra, O. A. P., Vargas, C. E. B., & Vargas, B. B. M. (2010). Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr). *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 33(2), 138–144.
 24. Rha, CH. 1978. Rheology of fluid foods. *Food Technol.* 32(7): 77-82.
 25. Riveiro, L. C. (2008). Reología de Productos Alimentarios. Universidad de Santiago de Compostela.
 26. SINCHI, I. A. de I. C., & PRONATTA, P. N. de T. de T. A. (2000). Manejo poscosecha y transformacion de frutales nativos promisorios de la Amazonía colombiana. (Produmedios, Ed.). Bogotá.

27. Streeter, V. L. 1996. Mecánica de fluidos. Mexico : McGraw Hill. 594 p.
28. S. Oka, The Principles of Rheometry, Rheology: Theory and Applications (F.E.Eirich, ed.), vol. 2, New York, Academic Press, 1960.
29. Steffe, J.F. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd Ed. Freeman Press, East Lansing, Michigan State, USA. 418 p.
30. VILLACHICA, H. 1996. Frutales y Hortalizas Promisorias de la Amazonía. Tratado de Cooperación Amazónica. Secretaría Protempore. FAO. Lima. Perú. 366 p.
31. Vriesmann, L. C., Silveira, J. L. M., & Petkowicz, C. L. D. O. (2009). Chemical and rheological properties of a starch-rich fraction from the pulp of the fruit cupuassu (*Theobroma grandiflorum*). *Materials Science and Engineering C*, 29(2), 651–656. <http://doi.org/10.1016/j.msec.2008.12.011>

ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS DE ANÁLISIS PROXIMAL

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	
	FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS	
	Av. de la Cultura 722 Pabellón C - Of. 106	Apartado Postal 921 - Cusco Perú Teléfono - fax - modem: 224831
UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO		
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA		
INFORME DE ANALISIS		
		N90452-14-LAQ
SOLICITANTE:	PEDRO PEREZ ALFERES	
MUESTRA :	PULPA DE COPCAZU	
FECHA :	0/24/07/2014	
RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:		
=====		
Humedad %	84.79	NTP 206.011
Proteina %	0.85	AOAC 935.39C
Grasa %	0.02	NTP 206.017
Ceniza %	0.67	AOAC 935.39B
Fibra %	0.11	FAO 14/7
Carbohidratos %	13.67	Diferencia
=====		
.		
Cusco, 01 de Agosto 2014		
 		
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Unidad de Prestación de Servicios Académicos Melquiades Herrera Artilica RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO		

ANEXO 02: GALERIA DE FOTOS

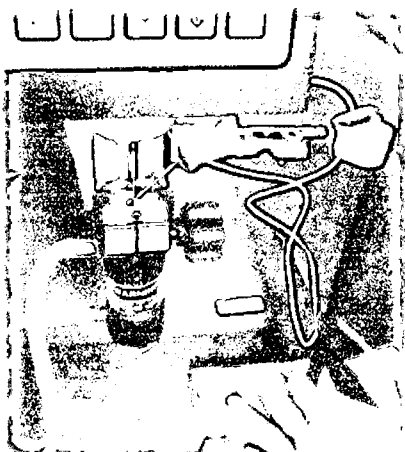


Figura 1: Dispositivo ULA y sensor de temperatura

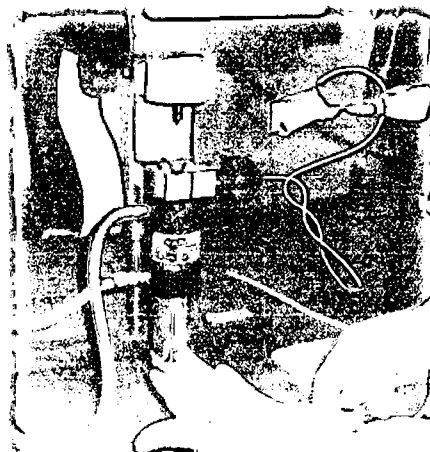


Figura 2: Colocación de la muestra para medición reométrica.

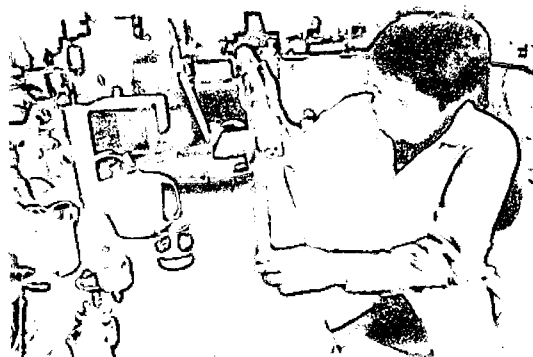


Figura 3. Pipeteador automático y preparación de muestras

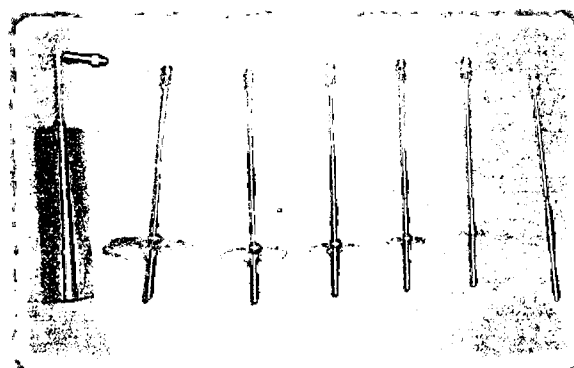


Figura 4: Spindles para evaluación reométrica

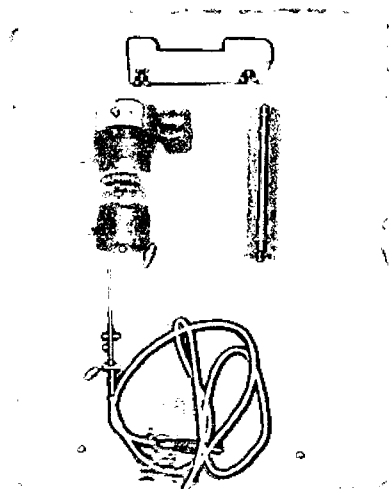


Figura 5: Accesorio completo UL adapter (Spinde ULA)



Figura 6: Digestores para determinación de proteínas



*Figura 7: Trabajo en laboratorio
(Análisis proximal)*

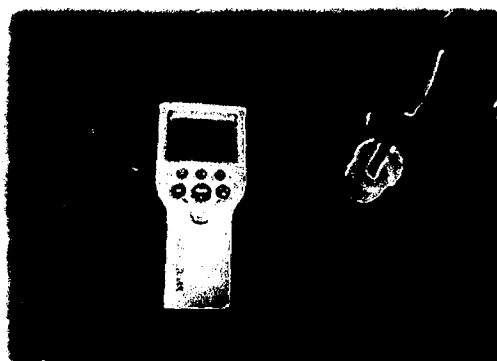


Figura 8: Peachímetro de laboratorio



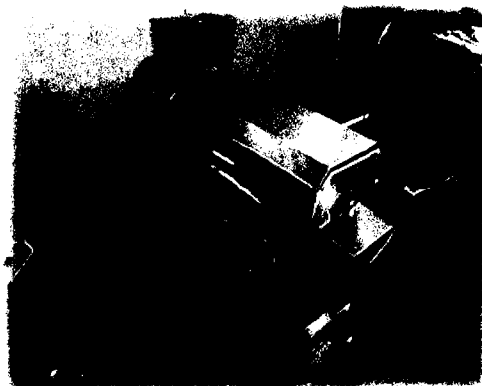
*Figura 9: Pícnometría de
la pulpa de Copoazú*



*Figura 10: Trabajo de
campo. Recolección del fruto*



*Figura 11. Equipo integrado para
reometría*



*Figura 12: Despulpadora de
frutas*

ANEXO 03

DATOS EXPORTADOS DEL SISTEMA REOMETRICO
PARAMETROS REOLOGICOS DE LA PULPA DE COPOAZU

Pulpa entera a 20 °C.

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
					<i>N / m²</i>		
1	29952.00	0.05	23.37	18.32	1.832	0.06	20.50
2	19072.00	0.10	29.84	23.33	2.333	0.12	20.40
3	16554.67	0.15	38.78	30.37	3.037	0.18	20.40
4	15328.00	0.20	47.86	37.49	3.749	0.24	20.33
5	14208.00	0.25	55.55	43.44	4.344	0.31	20.45
6	13632.00	0.30	63.90	50.02	5.002	0.37	20.28
7	13129.14	0.35	71.85	56.20	5.620	0.43	20.48
8	12752.00	0.40	79.74	62.38	6.238	0.49	20.20
9	12202.67	0.45	85.80	67.16	6.716	0.55	20.28
10	11609.60	0.50	90.72	70.99	7.099	0.61	20.18
11	11229.09	0.55	96.51	75.53	7.553	0.67	20.30

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

Pulpa entera a 30 °C

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn / cm²</i>	<i>N / m²</i>		
1	47360.00	0.05	37.04	28.96	2.896	0.06	30.15
2	24768.00	0.10	38.71	30.29	3.029	0.12	30.15
3	19200.00	0.15	45.05	35.22	3.522	0.18	30.20
4	16544.00	0.20	51.72	40.47	4.047	0.24	30.15
5	14720.00	0.25	57.53	45.01	4.501	0.31	30.08
6	13397.33	0.30	62.81	49.15	4.915	0.37	30.08
7	12489.14	0.35	68.32	53.46	5.346	0.43	30.00
8	11904.00	0.40	74.38	58.23	5.823	0.49	30.03
9	11520.00	0.45	80.98	63.40	6.340	0.55	30.05
10	11136.00	0.50	86.96	68.10	6.810	0.61	30.00
11	10763.64	0.55	92.50	72.40	7.240	0.67	29.95
12	10272.00	0.60	96.26	75.38	7.538	0.73	29.90
13	9846.15	0.65	99.95	78.27	7.827	0.79	29.85

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

Pulpa entera a 40 °C

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1 / s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn / cm²</i>	<i>N / m²</i>		
1	48128.00	0.05	37.58	29.43	2.943	0.06	39.88
2	27840.00	0.10	43.55	34.05	3.405	0.12	39.70
3	18730.67	0.15	43.93	34.36	3.436	0.18	39.53
4	15392.00	0.20	48.12	37.65	3.765	0.24	39.58
5	13491.20	0.25	52.74	41.25	4.125	0.31	39.95
6	12224.00	0.30	57.33	44.85	4.485	0.37	40.00
7	11337.14	0.35	61.97	48.53	4.853	0.43	40.10
8	10624.00	0.40	66.37	51.97	5.197	0.49	40.10
9	9941.33	0.45	69.93	54.71	5.471	0.55	40.13
10	9088.00	0.50	71.03	55.57	5.557	0.61	40.08
11	8634.18	0.55	74.20	58.08	5.808	0.67	40.15
12	8234.67	0.60	77.22	60.43	6.043	0.73	40.15
13	8182.15	0.65	83.11	65.04	6.504	0.79	40.18

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

Pulpa entera a 50 °C

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1 / s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn / cm²</i>	<i>N / m²</i>		
1	38016.00	0.05	29.69	23.25	2.325	0.06	50.40
2	22272.00	0.10	34.82	27.24	2.724	0.12	50.45
3	17365.33	0.15	40.68	31.86	3.186	0.18	50.53
4	14944.00	0.20	46.73	36.55	3.655	0.24	50.55
5	13542.40	0.25	52.85	41.41	4.141	0.31	49.78
6	12522.67	0.30	58.68	45.95	4.595	0.37	49.83
7	11629.71	0.35	63.61	49.78	4.978	0.43	49.98
8	10928.00	0.40	68.25	53.46	5.346	0.49	49.95
9	9941.33	0.45	69.86	54.71	5.471	0.55	49.95
10	8921.60	0.50	69.72	54.56	5.456	0.61	49.98
11	8587.64	0.55	73.79	57.76	5.776	0.67	50.05
12	8245.33	0.60	77.25	60.50	6.050	0.73	50.18
13	7857.23	0.65	79.76	62.46	6.246	0.79	50.23
14	7277.71	0.70	79.57	62.30	6.230	0.86	50.25
15	6732.80	0.75	78.86	61.76	6.176	0.92	50.20

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

PULPA DILUIDA 8 °Brix a 20 °C.

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn/cm²</i>	<i>N/m²</i>		
1	8.96	5.00	0.72	0.55	0.055	6.12	20.03
2	58.24	20.00	18.21	14.25	1.425	24.46	20.20
3	55.04	35.00	30.14	23.56	2.356	42.81	20.35
4	46.34	50.00	36.20	28.33	2.833	61.15	20.50
5	36.43	65.00	37.04	28.96	2.896	79.50	20.68
6	34.96	80.00	43.70	34.20	3.420	97.84	20.73
7	35.50	95.00	52.74	41.25	4.125	116.19	20.85
8	26.71	110.00	45.90	35.93	3.593	134.53	20.98
9	27.96	125.00	54.57	42.74	4.274	152.88	21.08
10	23.09	140.00	50.47	39.53	3.953	171.22	21.13
11	20.69	155.00	50.13	39.21	3.921	189.57	21.15
12	21.84	170.00	58.00	45.40	4.540	207.91	21.25
13	21.03	185.00	60.79	47.59	4.759	226.26	21.35
14	18.30	200.00	57.18	44.77	4.477	244.60	21.50
15	18.43	215.00	61.94	48.45	4.845	262.95	21.55

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

PULPA DILUIDA 6 °Brix a 20 °C.

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn/cm²</i>	<i>N/m²</i>		
1	43.20	20.00	13.48	10.57	1.057	24.46	20.03
2	37.12	30.00	17.41	13.62	1.362	36.69	19.95
3	30.56	40.00	19.15	14.95	1.495	48.92	20.00
4	27.90	50.00	21.80	17.06	1.706	61.15	19.95
5	25.28	60.00	23.69	18.55	1.855	73.38	19.90
6	22.86	70.00	24.97	19.57	1.957	85.61	19.95
7	21.20	80.00	26.47	20.74	2.074	97.84	20.03
8	21.76	90.00	30.57	23.95	2.395	110.07	20.05
9	19.46	100.00	30.44	23.79	2.379	122.30	20.10
10	18.50	110.00	31.84	24.89	2.489	134.53	20.23
11	17.76	120.00	33.29	26.06	2.606	146.76	20.38

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

PULPA DILUIDAD 4 °Brix a 20 °C.

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn/cm²</i>	<i>N/m²</i>		
1	29.87	30.00	13.99	10.96	1.096	36.69	21.18
2	22.78	50.00	17.79	13.93	1.393	61.15	21.40
3	17.37	70.00	19.02	14.87	1.487	85.61	22.08
4	16.64	90.00	23.36	18.32	1.832	110.07	22.68
5	14.55	110.00	25.02	19.57	1.957	134.53	22.55
6	13.69	130.00	27.76	21.76	2.176	158.99	23.30
7	12.50	150.00	29.25	22.93	2.293	183.45	23.78
8	11.63	170.00	30.87	24.19	2.419	207.91	24.13
9	10.85	190.00	32.24	25.20	2.520	232.37	24.40
10	10.36	210.00	33.98	26.61	2.661	256.83	24.50
11	10.10	230.00	36.32	28.41	2.841	281.29	24.65

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)

PULPA DILUIDAD 3 °Brix a 20 °C.

N°	Viscosidad <i>cP</i>	Veloc. <i>rpm</i>	Torque %	Esf.Cortante		Gradiente <i>1/s</i>	Temp. °C
				<i>Dyn/cm²</i>	<i>N/m²</i>		
1	16.26	50.00	12.69	9.94	0.994	61.15	21.25
2	12.34	70.00	13.48	10.57	1.057	85.61	21.58
3	10.52	90.00	14.85	11.58	1.158	110.07	21.90
4	9.54	110.00	16.39	12.84	1.284	134.53	22.25
5	8.86	130.00	17.96	14.09	1.409	158.99	22.50
6	8.36	150.00	19.57	15.34	1.534	183.45	22.78
7	7.79	170.00	20.72	16.20	1.620	207.91	22.98
8	7.58	190.00	22.52	17.61	1.761	232.37	23.25
9	7.13	210.00	23.43	18.32	1.832	256.83	23.38
10	6.87	230.00	24.66	19.33	1.933	281.29	23.45

Fuente: Rheocalc V3.1-1, elaboración propia (2104)



**INFORME DE CONFORMIDAD DE LEVANTAMIENTO DE
OBSERVACIONES**

Puerto Maldonado, 08 de febrero de 2016

Mediante el presente, los Docentes:


- Ing. Javier Eduardo Díaz Viteri
- Ing. Raúl Huamán Cruz
- Dra. Roxana Madueño Portilla

Miembros del Jurado Calificador de la Tesis intitulada:

“Comportamiento reológico de la pulpa tamizada de Copozú (*Theobroma grandiflorum*)”, sustentada por el Bachiller **PEDRO JOAQUIN PEREZ ALFERES**, el 23 de diciembre de 2015, en la Ciudad Universitaria de la UNAMAD, emitimos el presente **INFORME DE CONFORMIDAD DE LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES**, con lo cual el Señor Tesista ha cumplido con realizar las modificaciones a las observaciones realizadas durante la sustentación de la Tesis.

Es todo cuanto informamos a Usted Señor Decano, para los fines correspondientes.


Atentamente;



Ing. Javier Eduardo Díaz Viteri
Presidente



Ing. Raúl Huamán Cruz
Secretario



Dra. Roxana Madueño Portilla
Vocal