

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS REOLÓGICOS ASOCIADOS
AL ZUMO DE PIÑA”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICA

[Handwritten signatures]
Catherin Sanchez Casas

FRANCO MATOS CHRISTIAN EDUARDO

SANCHEZ CASAS CATHERIN CARLA

Callao, 2018

PERÚ

DEDICATORIA

A Dios, por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado la vida para lograr nuestros objetivos, porque ha estado con nosotros en cada paso que damos, cuidándonos y dándonos fortaleza para continuar, además de su infinita bondad y amor.

A nuestros padres, pilares fundamentales en nuestras vidas, quienes han sido los guía y el camino para poder llegar a este punto de la carrera, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos para que nosotros tampoco lo hiciéramos, depositando su entera confianza en cada reto que se nos presentaba sin dudar ni un solo momento de nuestra capacidad e inteligencia, con mucho amor y cariño, les dedicamos todo nuestro esfuerzo, en reconocimiento a todo el sacrificio puesto en cada uno de nosotros, para que pudiéramos culminar nuestros estudios.

AGRADECIMIENTO

Le agradecemos a Dios por habernos permitido vivir hasta este día, por acompañarnos y guiar a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarnos una vida llena de aprendizajes, experiencia, felicidad y sobre todo conocimiento.

Les agradecemos a nuestros padres por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos han inculcado, y por habernos dado la oportunidad de tener una carrera profesional, por todos esos momentos de esfuerzos y sacrificios compartiendo tristezas y alegrías, éxitos y fracasos y por todos esos detalles que nos brindaron durante mi vida, deseamos de todo corazón que nuestro triunfo como personas y profesionales lo sientan como el suyo propio.

A nuestros catedráticos por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por su tiempo, consejos, paciencia y los conocimientos que nos transmitieron a través de su experiencia.

Un agradecimiento especial a nuestro asesor de tesis el Dr. Ing. Luis Américo Carrasco Venegas, por su apoyo incondicional para que se lleve a cabo la ejecución de nuestro proyecto de tesis, brindándonos la asesoría respectiva de tal manera que tengamos claro el fin del proyecto de investigación.

ÍNDICE

	Pagina
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 Determinación del problema	11
1.2 Formulación del problema	13
1.2.1 Problema General.....	13
1.2.2 Problemas específicos.....	13
1.3 Objetivos de la investigación	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Justificación	14
II. MARCO TEORICO	15
2.1 Antecedentes del estudio	15
2.2 Marco conceptual	17
2.2.1 Descripción de la piña	17
2.2.2 Variedades de Piña plantadas en el Perú.....	20
2.2.3 Zumo de la piña.....	22
2.2.4 Reología	23
2.2.5 Reología en los alimentos.....	24
2.2.6 La Viscosidad.....	25
2.2.7 Definición de fluidos	29
2.2.8 Modelos de Ajustes para comportamientos Reológicos	42
2.2.9 Definición de términos básicos.....	48
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	50
3.1 Definición de las variables de la investigación	50
3.2 Operacionalización de variables	51
3.3 Formulación de hipótesis	52
3.3.1 Hipótesis General.....	52
3.3.2 Hipótesis Especificas.....	52

IV. METODOLOGIA.....	53
V.- RESULTADOS.....	61
VI.-DISCUSION DE RESULTADOS	66
VII.-CONCLUSIONES	67
VIII.-RECOMENDACIONES.....	68
IX.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS.....	72

TABLAS DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Producción mundial de piña.....	18
Figura N° 2.2: Producción nacional de piña.....	19
Figura N° 2.3: Evolución de la producción nacional de piña.....	20
Figura N° 2.4: Curva de Fluidez	26
Figura N° 2.5: Curvas de flujo newtoniano.....	31
Figura N° 2.6: Influencia de Gradiente de Velocidad de una muestra.....	35
Figura N° 2.7: Curvas de Flujo pseudoplasticos.....	37
Figura N° 2.8: Curvas de flujo Dilatante.....	38
Figura N° 2.9: Curva de flujo Tixotrópico.....	40
Figura N° 3.1: Relación de las variables de la investigación.....	50
Figura N° 4.1: Preparación del Zumo de Piña.....	54
Figura N° 4.2: Medición de °Brix del Zumo de Piña	59
Figura N° 4.3: Experimentación a escala piloto.....	60

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1:	Producción de piña a nivel nacional desde el año 2008 hasta el año 201319
Tabla N° 2.2:	Valores de esfuerzo de cedencia de algunos alimentos34
Tabla N° 2.3:	Modelos de ecuaciones de ajuste reológicos independientes del tiempo43
Tabla N° 2.4:	Valores de parámetros de algunos tipos de fluidos44
Tabla N° 4.1:	Clasificación taxonómica de la piña Golden53
Tabla N° 4.2:	Análisis a través del brixometro para el zumo de piña60
Tabla N° 5.1:	Reporte de datos de viscosidad dinámica, velocidad de corte y esfuerzo de corte a malla +14061
Tabla N° 5.2:	Reporte de datos de viscosidad dinámica, velocidad de corte y esfuerzo de corte a malla +20062

INDICE DE GRAFICAS

Grafica N° 5.1: Esfuerzo de Corte Vs Veloc. de Corte a malla +140.....	61
Grafica N° 5.2: Viscosidad Dinámica Vs Veloc. de Corte a malla +140..	62
Grafica N° 5.3: Esfuerzo de Corte Vs Veloc. de Corte a malla +200.....	63
Grafica N° 5.4: Viscosidad Dinámica Vs Veloc. de Corte a malla +200.....	63

RESUMEN

La presente tesis pretende determinar los modelos reológicos que están asociados al zumo de piña, relacionando los datos experimentales de esfuerzo de corte, velocidad de corte y la viscosidad dinámica, que se obtendrán a través de la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte, siendo complementados luego con la relación que se da entre la velocidad de corte y la viscosidad dinámica.

En esta oportunidad utilizamos la piña "Anana Camosus", popularmente conocida como la piña golden como materia prima de investigación.

Obtuvimos el zumo de la piña a través de un colador de manera sencilla, para luego ser sometido por dos tipos de malla con abertura +140 y +200, luego se ejecutó en el reómetro a tres temperaturas distintas las cuales fueron 20°C, 30°C y 40°C, para luego obtener los datos experimentales, a los cuales se les hizo su análisis respectivo.

El método que se utilizó fue el de optimización de la función objetivo en el cual obtuvimos los distintos parámetros de los modelos que se plantearon como posibles modelos que se ajusten al zumo de piña.

Luego del tratamiento de datos experimentales y análisis de sus gráficos respectivos, se determinó que los modelos que se ajustan al zumo de piña son los modelos de Herschel-Bulkey y Cross, los cuales demuestran que se comporta como un fluido plástico real.

ABSTRACT

The present thesis aims to determine the rheological models that are associated with pineapple juice, relating the experimental data of shear, cutting speed and dynamic viscosity, which will be obtained through the numerical relationship between the cutting speed and the effort Of cutting, being then complemented with the ratio between the cutting speed and the dynamic viscosity.

In this opportunity we use the pineapple "Anna Camosus", popularly known as golden pineapple as raw material for research. We obtained the juice of the pineapple through a strainer in a simple way, then to be submitted by two types of mesh with opening +140 and +200, then executed in the rheometer at three different temperatures which were 20 ° C, 30 ° C and 40 ° C, in order to obtain the experimental data, which were analyzed accordingly.

The method used was the optimization of the objective function in which it obtained the parameter parameters that were proposed as possible models that fit the size of the pineapple

After the treatment of experimental data and analysis of their graphs, it was determined that the models that adjust to the rhythm of the pineapple are the Herschel-Bulkey and Cross models, which show that it can be purchased as a real plastic fluid.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

Cuando en una disolución verdadera se observa un comportamiento de flujo ideal, sin presentar una tensión mínima de deformación, y un índice de comportamiento de flujo igual a la unidad, las características del flujo del sistema pueden ser representadas por un término, la viscosidad *(Rha, 1975)*.

Este comportamiento lo presentan un número limitado de sustancias comestibles, entre ellas el zumo de piña.

La medida de viscosidad puede ser hecha no solamente para indicar la consistencia de productos terminados, sino también como una herramienta de control de calidad en la materia prima, como también en el producto y durante varias etapas del proceso para predecir la consistencia final. Debido a ello, en las ecuaciones del modelo matemático planteado para las diversas operaciones que forman un determinado proceso, intervienen las constantes reológicas de los fluidos que se procesan y que se deben determinar, generalmente, mediante experimentación en cada caso particular. Es por ello que es de suma importancia la caracterización reológica de las diferentes corrientes fluidas y la deducción de ecuaciones que permitan calcular directamente las constantes Reológicas en función del alimento considerado y de las variables de operación *(Ibarz y col, 2005)*

Entre los alimentos que se encuentran en fase líquida, bien sea en el proceso industrial de preparación, o bien en la presentación y utilización por el consumidor, puede citarse las pastas, purés, néctar, jugos, lácteos zumos naturales de frutas, salsas entre otros *(Ibarz y col, 2005)*.

Por lo tanto a la hora de llevar a cabo la determinación del parámetro de viscosidad en dichos fluidos alimenticios, se debe tener en cuenta dos aspectos: en primer lugar que la viscosidad depende tanto de la velocidad de deformación como de la duración de la deformación, por ese motivo las determinaciones deben hacerse bajo condiciones especiales (**Adamson, 1979**).

Sin embargo cabe mencionar que los líquidos fluyen como si estuvieran compuestos de capas individuales; la fricción resultante de la resistencia al flujo entre las capas del líquido o la resistencia que presenta una sustancia a la deformación cuando está sujeta a una fuerza de deformación, es llamada consistencia o viscosidad aparente. (**Ibarz, Vicente y Graell, 2006**).

Esta resistencia es el resultado del movimiento de moléculas en el interior del líquido debido al movimiento Browniano y a la fuerza de cohesión intermolecular. Algunos fluidos que son químicamente puros y físicamente homogéneos (Fluidos Newtonianos), tiene un valor constante de resistencia que es usualmente llamada viscosidad o viscosidad absoluta. Sin embargo, el término consistencia es comúnmente usado para productos alimenticios que no son químicamente puros ni físicamente homogéneos (Fluidos no Newtonianos) (**Ibarz, Vicente y Graell, 2006**).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cuáles son los modelos reológicos asociados al zumo de piña?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte determinado experimentalmente para el zumo de piña?
- b. ¿Cómo debe ser la correlación no lineal de los datos experimentales conducentes a obtener los parámetros reológicos asociados al zumo de piña?
- c. ¿Cómo son los reogramas asociados al zumo de piña a temperaturas diversas?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

- a. Determinar los modelos reológicos asociados al zumo de piña.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a. Obtener en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para el zumo de piña.
- b. Obtener los parámetros reológicos de los modelos asociados al zumo de piña mediante el método de optimización de función objetivo
- c. Elaborar los reogramas asociados al zumo de piña a las temperaturas de prueba.

1.4 Justificación

En la actualidad la demanda de alimentos es cada vez mayor debido al incremento de la población en las últimas décadas; como consecuencia, la industria de los alimentos se ve en la necesidad de usar nuevas tecnologías y métodos para tener una producción de buena calidad y así, poder satisfacer las necesidades de los consumidores.

La reología se utiliza en la industria alimentaria para definir las consistencias de diferentes productos, reológicamente, la consistencia viene descrita por la viscosidad y ésta es importante para el desarrollo, la manufactura y el procesamiento de alimentos. En otras palabras, los datos reológicos son necesarios en la industria alimentaria, ya que ayudan a encontrar la relación entre el comportamiento de las propiedades y la estructura del alimento; así mismo, son indispensables para el cálculo de la ingeniería de procesos la cual involucra una amplia gama de equipos. Por lo tanto, el conocimiento de los datos reológicos lleva a un mejor control de los procesos y, sobre todo, a conseguir la aceptación del producto por el consumidor

***Fuente: R. Escudero Cadena ,2014 en la investigación titulada:
“Propiedades Reológicas de productos alimenticios
derivados de frutas y hortalizas”***

Además podemos agregar que tecnológicamente se logrará determinar los parámetros de los modelos matemáticos asociados al zumo de piña utilizando un reómetro. A través de estos modelos se puede realizar el diseño de equipos para su posterior uso industrial.

II. MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes del estudio

A continuación se presenta antecedentes de estudios que guardan relación directa con el objeto de estudio de esta investigación.

***(R. ESCUDERO CADENA ,2014) EN LA INVESTIGACIÓN TITULADA:
"PROPIEDADES REOLÓGICAS DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS
DERIVADOS DE FRUTAS Y HORTALIZAS"***

Durante la presente investigación, se dio a conocer las propiedades Reológicas reportadas de distintos productos alimenticios, las mermeladas comerciales de albaricoque, arándano y escaramujo se clasificaron como fluidos tixotrópicos con comportamiento pseudoplásticos, así como la mermelada casera de nopal, sin embargo, la mermelada comercial de mango mostró un comportamiento pseudoplástico con límite elástico. El jugo de tomate comercial se clasificó como un fluido tixotrópico con comportamiento pseudoplástico, mientras que los jugos de manzana y melocotón mostraron comportamientos newtonianos. Las papillas de zanahoria casera y comercial analizadas en función de la velocidad de corte y el número de husillos presentaron un comportamiento tixotrópico y la papilla comercial de zanahoria analizada en función de la temperatura mostró un comportamiento pseudoplástico. Por otro lado, las papillas de manzana, plátano y albaricoque se clasificaron como un comportamiento reológico de tipo viscoelástico. Las pulpas de mango Manila, mango Kent, tuna y zapote se comportaron como fluidos pseudoplásticos. Además, se pudo observar que los modelos reológicos más utilizados en las publicaciones consultadas, fueron el modelo de Herschel-Bulkley y el modelo de la ley de la potencia. Los parámetros reportados en dichos trabajos, aunque

diferentes entre sí, pueden tomarse como referencia del tipo de comportamiento viscoso que tendrá cada alimento.

(H. GALLEGO; C. ÁLVAREZ; C.VÉLEZ; A. FERNÁNDEZ, 2012)
“CARACTERIZACIÓN REOLOGICA DE DOS SALSAS ALIMENTICIAS”

Se caracterizó reológicamente dos salsas utilizadas como aderezos para alimentos, lo que permitió definir las como fluidos pseudoplásticos utilizando el modelo de Herschel-Bulkley. Posteriormente, se evaluó la dependencia de la viscosidad con el tiempo y se caracterizó como fluidos tixotrópicos mediante la aplicación del modelo estructural de Tiu & Boger. En cuanto a los parámetros del modelo estructural y su relación con la velocidad de corte empleada.

(A. GARCÍA CARRILLO; M.RAVENTÓS; F.BELÉN, 2011)
“APLICACIÓN DE LA MDP (METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PROYECTOS-UPC): MÉTODO PARA OPTIMIZAR PARÁMETROS REOLÓGICOS EN FLUIDOS MANEJADOS A BAJAS TEMPERATURAS”

Estudiaron los modelos matemáticos que describen la viscosidad (como propuesta de solución al problema que se aborda en el caso de estudio) son una forma práctica para definir el comportamiento de la viscosidad de zumo de piña a temperaturas cercanas a la congelación en el intervalo de concentración de 54 a 12,3 °Brix respecto al aumento de la velocidad de corte. Estos modelos permiten estimar parámetros para el diseño y selección de equipos de manejo de fluidos en estas condiciones.

(L. CÁRCAMO ALVARADO ,2005) EN LA INVESTIGACIÓN TITULADA
“COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE PASTA DE MURTA (UGNI MOLINAE TURCZ) EN ESTADO FRESCO Y CONGELADO”

Analizaron tres modelos reológicos analizados, el modelo de Ostwald-de Waele, el modelo de Casson modificado y el modelo de Herschel-Bulkley, son relevantes para la descripción del comportamiento reológico de las

pastas de murta. Sin embargo, el modelo de Ostwald-de Waele, conocido también como el modelo de la Ley de Potencia, es el que más se ajusta a los datos reológicos obtenidos experimentalmente

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Descripción de la piña

Es una fruta tropical originaria de América del Sur. No se sabe con certeza el país donde se dio origen, pero los estudios señalan a Brasil, Paraguay y Argentina. De ahí se propagó principalmente al Amazonas, Venezuela y Perú para luego emigrar a Europa y Asia. Es una fruta muy tropical extendida por la Selva Peruana. Con su forma y corona distintiva la piña es una fruta muy disfrutada en la gastronomía latina caribeña y ha sido el producto procedente de América Latina que más éxito y aceptación ha tenido en Europa.

Los indígenas la llamaron Ananas que significa fruta excelente.

El nombre piña (o pineapple en inglés) proviene de la similaridad de la fruta a la semilla o cono de los pinos.

La piña o ananá es una fruta de una planta de la familia de las bromeliáceas, que contiene alrededor de 1.400 especies en todo el mundo.

Muchos de los miembros de esta familia son epifíticos, es decir, que viven encima de otras plantas en zonas de clima tropical.

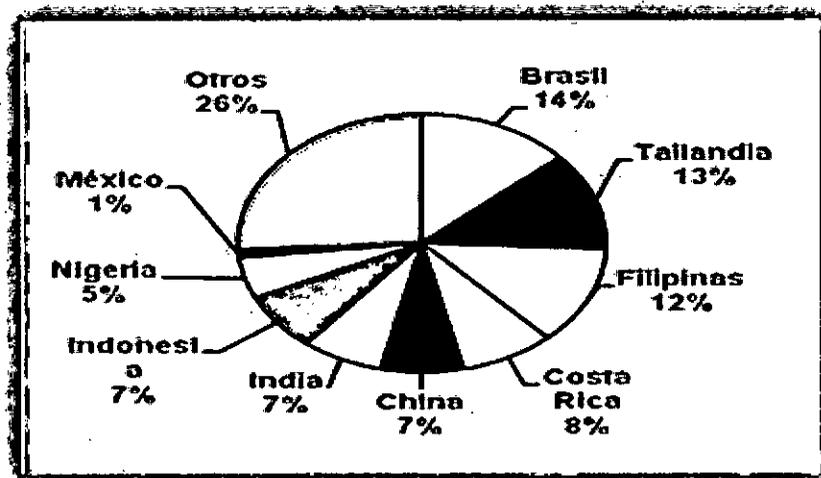
La planta de la piña, a diferencia de estas, nace sobre tierra firme.

La demanda internacional de la piña sigue en crecimiento principalmente gracias a los hábitos alimenticios de los consumidores americanos y europeos que consideran a esta fruta tropical, como una de las más finas del mundo, destacando en ella su agradable sabor y aroma y su contenido de vitamina C.

Siendo Brasil el mayor productor seguido de Tailandia, Filipinas y Costa Rica; en la figura N° 2.1 se aprecia la participación de los principales países productores de piña en la producción mundial en porcentaje.

FIGURA N° 2.1

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PIÑA



Fuente: Proyecto Especial Pichis Palcazu

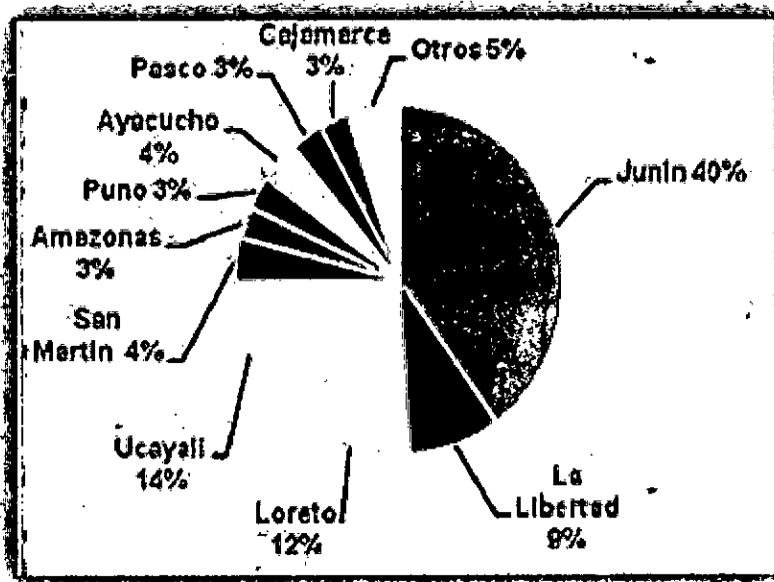
• Producción y mercado nacional de piña

Las áreas plantadas de piña se han incrementado durante los últimos años, en todo el país, incluido la costa norte habiéndose plantado principalmente las siguientes variedades en orden de importancia 'Hawaiana', 'Samba', 'Golden' y 'Cayena Lisa' en Chanchamayo y Satipo; y en las otras localidades el híbrido MD-02 (Golden) y Cayena Lisa.

En la figura N°2.2 se observa la producción estimada en porcentajes en los diferentes departamentos del Perú.

FIGURA N° 2.2

PRODUCCIÓN NACIONAL DE PIÑA



Fuente: Proyecto Especial Pichis Palcazu

TABLA N° 2.1:

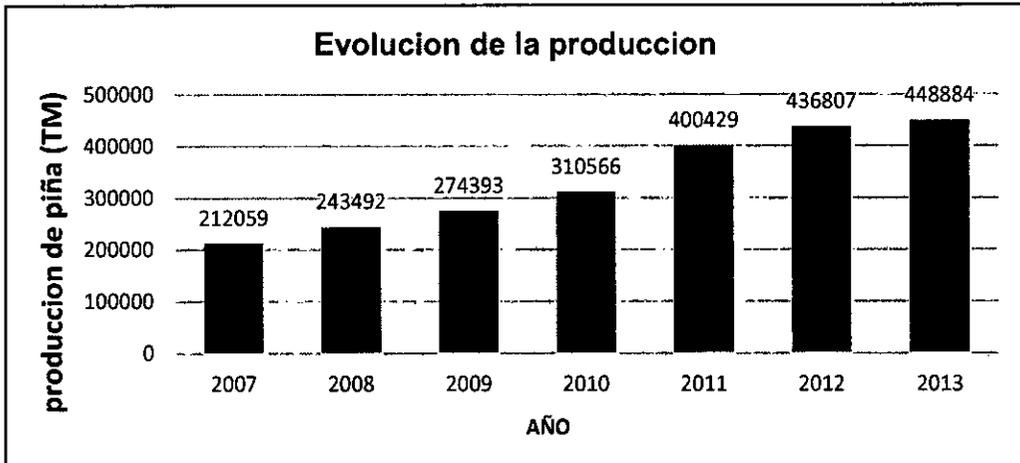
**PRODUCCIÓN DE PIÑA A NIVEL NACIONAL DESDE EL AÑO 2008
HASTA EL AÑO 2013**

Años	PRODUCCION (TM)
2008	243492
2009	274393
2010	310566
2011	400429
2012	436807
2013	448884

Fuente: MINAGRI

FIGURA N° 2.3

PRODUCCIÓN NACIONAL DE PIÑA



Fuente: MINAGRI

2.2.2 Variedades de Piña plantadas en el Perú

Como sabemos el cultivo de la piña se concentra principal - mente en la selva central del Perú, donde se plantan las dos variedades tradicionales como:

- **Samba**

Es la variedad tradicional y predominante de Chanchamayo; es rústica y se caracteriza por presentar plantas de porte mediano, hojas sin espinas, de borde cortante, erectas, largas y de ancho moderado; las hojas tienen fuerte presencia de antocianinas que le dan un color particular rojizo a las plantaciones. El fruto es de color rojo oscuro exteriormente, de forma algo cilíndrica (foto 5); con un peso que puede ser mayor de 1.5 kg/fruto, pulpa de color blanco amarillento; el contenido de azúcar es bajo (11 a 12 °Brix) y baja acidez.

- **Pucalpina o Negra**

Se cultiva en la región Ucayali. Se caracteriza por presentar un planta de porte muy vigoroso, hojas sin espinas, de borde cortante; fruto grande (mayores de 2.5 Kg.), de corona simple, de forma cónica a cilíndrica (foto 6) y se deforma cuando los frutos alcanzan tamaño superiores a los 3 Kg/fruta; piel de color anaranjado rojizo a la madurez; de “ojos” grandes y planos, con las cavidades florales profundos que la dan una apariencia cribosa al pelar la fruta, la pulpa tiene un color blanco amarillento, de bajo brix (12 °B) y baja acidez; tiene muchos bulbillos.

- **Roja Trujillana**

Esta variedad es cultivada en la región de La Libertad. Se caracteriza por presentar un porte de planta mediano, de hojas lisas sin espinas de color verde oscuro-rojizo; fruto de tamaño medio, de corona simple, de forma mayormente cilíndrica, con muchos bulbillos en la base del fruto y pocos hijuelos. El brix está alrededor de 12, es ligeramente más ácida.

- **Motilona**

Es conocida también como ‘Azúcar’, ‘Blanca’, ‘Lagarto’, ‘Guayaquil’ y ‘Hawaiana’; es cultivada en Chanchamayo-Satipo en Junín, Valle del Río Apurímac en Ayacucho y Coshñipata en Cusco. El fruto es de baja calidad, pulpa muy frágil, de bajo contenido de azúcar (11 °Brix) y baja acidez; la piel a la madurez es de color Amarillo - anaranjado - verde; el mayor defecto del fruto es su maduración desuniforme y su fragilidad al transporte; esto debido al tamaño que alcanza.

- **Cayena Lisa**

Fue la variedad más plantada hasta la década de los 90, y presenta varios cultivares entre las representativas están 'Hilo' y 'Champaka'.

La tecnología en piña se ha generado alrededor de esta variedad y a tenido la supremacía del mercado mundial por más de 50 años antes de ser reemplazado por el híbrido MD-02.

- **Híbrido MD-02 o 'Golden'**

Fue introducido al Perú en 1989 desde Costa Rica por Agrícola Italia SAC empresa privada pionera dedicada al cultivo de piña. En los últimos años ha desplazando a la Cayena Lisa del mercado mundial de fruta fresca por la calidad de la fruta. Actualmente el primer país productor y exportador es Costa Rica. Se considera un híbrido más precoz que la Cayena Lisa, porte de planta mediano, con hojas sin espinas de color verde oscuro, fruto de forma cilíndrica de cáscara amarillo verde a la madurez, pulpa amarillo intenso, firme, de sabor agradable, Brix alto; es considerada como una piña de alta calidad. Es mucho más exigente a condiciones de manejo y necesidad de nutrientes que las otras variedades. Es más susceptible a la "pudrición del corazón" y de las raíces así como, el ataque por bacteria.

2.2.3 Zumo de la piña

El zumo es el líquido que se extrae de los vegetales o frutas, normalmente por presión, aunque el conjunto de procesos intermedios puede suponer la cocción, molienda o centrifugación de producto original. Generalmente, el término hace referencia al líquido resultante de exprimir un fruto. Así, el jugo o zumo de piña es el líquido extraído de la piña, la cual está conformada por agua, proteínas, vitaminas y minerales, además de otros nutrientes como fibra, calorías o colesterol.

Las propiedades Reológicas dependientes del tiempo en el zumo de piña, se obtiene en función de la variación de dos parámetros: la temperatura y la concentración

2.2.4 Reología

El uso de la palabra "reología" se atribuye a Eugene Crawford Bingham en 1928, a partir de los trabajos de Heráclito (filósofo pre-socrático griego), dándole el significado de "cada cosa fluye" (*Reiner, 1964*).

En este momento, la reología se ha establecido como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia, es decir, la manera en la cual los materiales responden a un esfuerzo o tensión aplicada. El término en sí mismo procede de la palabra griega *rheos* que significa flujo (*Ibarz, 2005*).

La reología estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, substancias asfálticas, materiales cristalinos y otros, por lo tanto el campo de la reología se extiende desde la mecánica de fluidos newtonianos hasta la elasticidad de Hooke, la región comprendida entre ellas corresponde a la deformación y flujo de todos los tipos de materiales pastosos y suspensiones (*Bird, 1998*).

Todos los materiales tienen propiedades reológicas, es por eso que la reología es muy importante en la geología, la minería, mecánica de suelos, procesamiento de polímeros y composiciones, dispersión de pinturas y pigmentos, sangre, bioingeniería, industria alimentaria, entre otros.

2.2.5 Reología en los alimentos

La Reología de los alimentos se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de las materias primas, intermedios y los productos finales de la industria alimentaria (*White, 1970*).

Uno de los más grandes laboratorios donde se pueden observar todo tipo de comportamientos reológicos es la cocina. Por ejemplo, la elasticidad que tiene la clara de huevo o la espuma que se forma cuando ésta se bate; la transformación de la gelatina desde una solución acuosa hasta un gel elástico y las extrañas propiedades de fluidez de la mayonesa, salsa de tomate o mantequilla de maní (*Krieger, 1979*)

Con respecto al tipo de propiedades de flujo que presentan los diferentes alimentos, ciertos líquidos como leche, miel, jugos de fruta, bebidas y aceites vegetales presentan propiedades de flujo sencillas, en cambio, los productos más espesos como los aderezos cremosos para ensaladas y la mayonesa se comportan de forma más complicada, por otro lado, los alimentos semisólidos como la crema de cacahuete y la margarina se comportan como sólidos y líquidos, es decir, presentan ambos tipos de comportamientos.

Importancia de la Reología en los Alimentos

La ciencia de la reología es muy importante en la industria alimentaria debido a que tiene muchas aplicaciones en la manipulación, procesamiento y aceptabilidad de los alimentos, así como en la tecnología aplicada.

La viscosidad, el tipo de comportamiento del flujo y la estructura del material, son aspectos básicos para el diseño del proceso y la buena calidad del producto terminado (*López, 2003*).

La calidad de los alimentos depende de la plasticidad, pseudoplásticidad y la propiedad de adelgazamiento por corte, factores determinados por la ciencia de la reología.

Concretamente, los datos reológicos de los alimentos son necesarios en la industria alimentaria para poder realizar cada una de las actividades que a continuación se mencionan:

- Cálculos necesarios para la ingeniería de procesos que involucran una amplia gama de equipos (tuberías, bombas, extrusores, amasadoras, máquinas de pintar, intercambiadores de calor, homogeneizadores, calentadores, viscosímetros en línea, etc.).
- Control de calidad de los productos intermedios o finales, este control se realiza en la propia línea de producción y es determinante para la aceptación de los productos.
- Evaluación de la textura de los alimentos mediante la correlación de los datos sensoriales, punto importante para que el producto sea aceptado por los consumidores.

2.2.6 La Viscosidad

La viscosidad se define como la propiedad de un fluido que ofrece resistencia al movimiento relativo de sus moléculas (*Mott, 1996*).

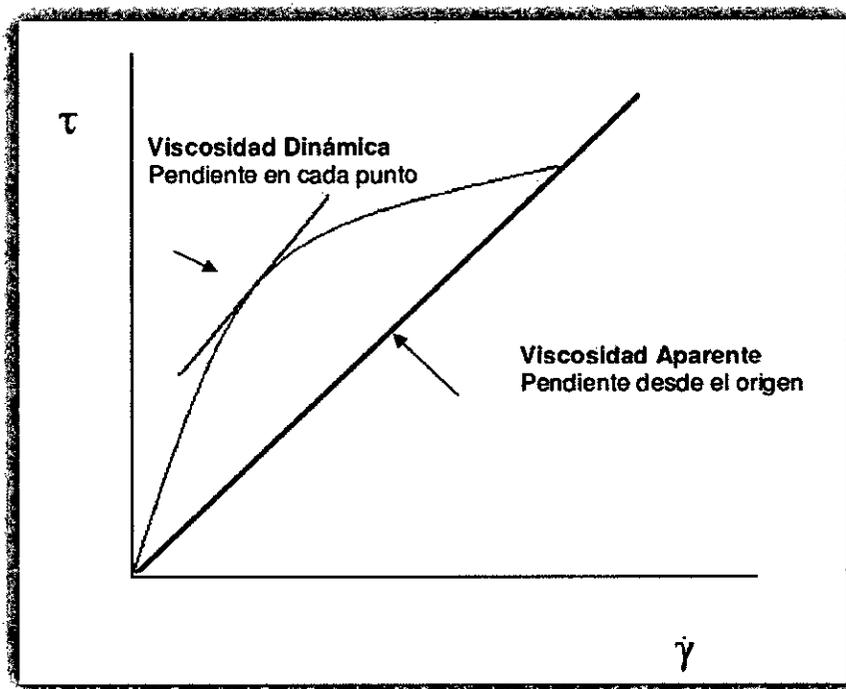
La facilidad con que un fluido se derrama es una indicación de su viscosidad, por ejemplo, el aceite frío tiene una alta viscosidad y se derrama muy lentamente, mientras que la del agua es relativamente baja y se derrama con bastante facilidad.

Tipos de Viscosidad

- Viscosidad dinámica o absoluta (μ): Es la pendiente en cada punto de la curva si es que se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante contra velocidad de deformación).
- Viscosidad cinemática (ν): Relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado.
- Viscosidad aparente (η): Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos de comportamiento no lineal

(Ramírez, 2006)

FIGURA N° 2.4
CURVA DE FLUIDEZ PARA REPRESENTAR LA VISCOSIDAD
DINÁMICA Y APARENTE



Fuente: (Ramírez, 2006).

A. Unidades

Las unidades de viscosidad aparente y dinámica más utilizadas son los mili Pascales por segundo (mPa.s), y en el sistema cegesimal la unidad de medida es el centipoise (cp.). Las unidades de la viscosidad cinemática en el sistema internacional son m²/s, mientras que en el sistema inglés se usan los cm²/s o llamados Stokes (St).

B. Factores que influyen en la viscosidad

Los factores principales que afectan la viscosidad suelen depender de las características del medio de suspensión y de los sólidos suspendidos, puede influir también el tamaño y la forma de las partículas, así como la concentración de sólidos, el peso molecular, la temperatura, la presión y la velocidad de corte (*Cubero et al, 2002*).

Existe usualmente una relación inversamente proporcional entre la viscosidad y la temperatura de los líquidos, es decir, un aumento en la temperatura provoca una disminución en la viscosidad. En cuanto a los gases, hay que decir que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la agitación y los choques de las moléculas del gas se oponen al movimiento produciendo un aumento de la viscosidad del gas.

Por otro lado, un aumento en la concentración del soluto genera un incremento no proporcional en la viscosidad a temperatura constante. A la misma concentración de soluto, un aumento en el peso molecular provoca un aumento no proporcional en la viscosidad del fluido. El efecto de la presión normalmente es ignorado en el estudio de los alimentos, ya que la viscosidad de la mayoría de los líquidos es esencialmente constante en un rango de presión de 0 a 100 atm (*Orrego, 2003*).

Equipos para determinar la viscosidad

Los viscosímetros son equipos relativamente sencillos, utilizados con el fin de medir la viscosidad del fluido dentro de un rango de velocidades de corte muy limitado; no tienen la capacidad de medir propiedades viscoelásticas. Existe una gran variedad de viscosímetros en el mercado, pero generalmente se pueden dividir en tres tipos:

Capilares: Son los instrumentos para la determinación de viscosidades más empleados por su relativa simplicidad, en este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo capilar observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico para fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Existen tres tipos de viscosímetros capilares: capilar de vidrio, capilar de pistón y de copa (*Chhabra y Richardson, 2008*).

Rotacionales: Este tipo de viscosímetros han cobrado importancia como herramientas muy importantes para la caracterización de fluidos no newtonianos, son capaces de provocar un flujo de la muestra produciendo un perfil de velocidad que permite realizar medidas de viscosidad a diferentes velocidades de corte. Los viscosímetros rotacionales constan básicamente de dos partes que se encuentran separadas por el fluido a estudiar, dichas partes pueden ser dos cilindros, dos superficies planas paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo. Aquí encontramos a los cilindros concéntricos; Bob and cup, platos paralelos, cono y plato (*Slattery, 1961*).

De cuerpo móvil: En los viscosímetros de cuerpo móvil, las características del movimiento de un cuerpo que puede ser una esfera, burbuja, disco, etc., en el fluido permiten determinar la viscosidad de éste. Un ejemplo es el viscosímetro de caída de bola o viscosímetro de Poiseuille (*Mott, 2006*).

Los reómetros: Son instrumentos muy complejos, altamente sensibles, y de gran precisión, miden la viscosidad del fluido dentro de un amplio rango de esfuerzos cortantes y de velocidades de corte, además tienen la capacidad de medir la viscoelasticidad de los fluidos, semi-sólidos y sólidos. Existen diferentes tipos de reómetros, como son capilares, rotacionales, los cuales en primera instancia se basan en el mismo principio que los viscosímetros estudiados anteriormente. Los reómetros funcionan provocando un flujo del material experimental y midiendo el esfuerzo generado o viceversa (Llumiyinga, 2012).

2.2.7 Definición de fluidos

Según *Muñoz, E. (2009)*, Arquímedes describe en su primer postulado sobre los cuerpos flotantes lo siguiente: La naturaleza de un fluido es tal que, estando sus partes continua y uniformemente colocadas, las partes menos comprimidas son desalojadas por las que lo están más, y cada una está comprimida por el fluido que hay sobre ella y según la dirección de la vertical.

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de esfuerzos cortantes (*Levenspiel, 1993*). Las propiedades reológicas de un fluido son uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en el ámbito industrial, dichas propiedades se definen a partir de la relación existente entre la fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo.

Todo fluido se va deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas, éstas se representan matemáticamente mediante el esfuerzo cortante τ_{xy} , mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$.

Los fluidos se clasifican en líquidos y gases, un líquido es aquel que está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantienen unido de tal manera que su volumen está definido, pero su forma no, presentan superficie libre y son incomprensibles ya que su densidad varía poco con la temperatura y la presión. Los gases constan de partículas en movimiento que chocan unas con otras y tratan de dispersarse de tal forma que no tienen forma ni volumen definido; la presión, la temperatura y el volumen que ocupan se relacionan a través de la ley de los gases, es decir, la ecuación apropiada del estado del gas (*Duarte, 2001*).

Los fluidos constituyen la mayor parte de los alimentos que ingiere el hombre; los adultos consumen más productos líquidos y pastosos que alimentos sólidos por la facilidad de ingestión y digestión; en los niños la importancia de los alimentos fluidos líquidos es fundamental.

A. Tipos de fluidos

Existen 3 tipos de fluidos, dentro de los cuales encontramos a los Newtonianos, que son aquellos en los cuales se presenta una proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, también existen fluidos en los cuales no existe la proporcionalidad antes mencionada, denominados no Newtonianos.

Por último tenemos a los fluidos que se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos; es decir, propiedades elásticas y viscosas, denominados Viscoelásticas (*Ramírez, 2006*).

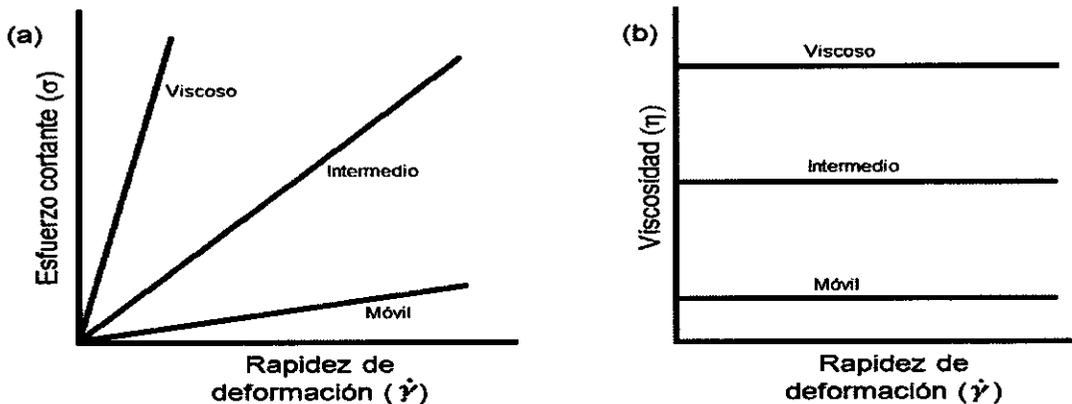
B. Fluidos newtonianos

Los newtonianos son fluidos en los que el deslizamiento relativo de los elementos del fluido al circular uno sobre otro, es proporcional al esfuerzo cortante aplicado sobre el fluido (*Levenspiel, 1993*).

Este tipo de fluidos tienen una viscosidad constante que depende de la temperatura, pero no de la velocidad de corte ni del esfuerzo cortante aplicado dentro del rango de flujo laminar. En la figura N° 2.5 la viscosidad está dada por la pendiente de la curva entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte.

FIGURA N° 2.5

FLUJO NEWTONIANO: (A) CURVA DE FLUIDEZ: ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN; (B) CURVA DE VISCOSIDAD: VISCOSIDAD CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN



Fuente: (Müller, 1973)

Observando la figura anterior, la viscosidad es constante para cualquier rapidez de deformación aplicada. Por lo tanto, si se duplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación se va a duplicar. Hay que tener en cuenta que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo.

Aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Un fluido newtoniano posee la forma más simple de las propiedades de flujo, sus características se describen adecuadamente mediante la siguiente ecuación:

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

Siendo τ : esfuerzo cortante (mPa)

μ : Constante de proporcionalidad, viscosidad (mPa.s)

γ : Velocidad de deformación del fluido (s^{-1}).

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación.

Algunos ejemplos típicos de fluidos newtonianos son el agua y las bebidas acuosas como el té, café, cerveza y bebidas gaseosas, jarabes de azúcar, la mayoría de las mieles, aceites comestibles, jugo filtrado, la leche, gases, líquidos de moléculas sencillas como el amoníaco, alcohol, benceno, petróleo, cloroformo, butano, etc.

C. Fluidos no newtonianos

Un fluido no newtoniano se define como aquel que exhibe flujo uniforme, en el cual no es constante la relación entre el esfuerzo tangencial y la rapidez de deformación; es decir, la viscosidad no es constante (**Müller, 1973**).

Un grupo particular de fluidos de interés es aquel en que la viscosidad eficaz varía con la velocidad de cizallamiento, es por eso que ha sido necesario desarrollar conjuntos especiales de reglas de operación y de diseño, ya que en muchos procesos industriales intervienen fluidos o mezclas de fluidos que se comportan de diversas formas complejas (**Metcalfe, 1984**).

Los fluidos no newtonianos son generalmente muy complejos y constan de más de una fase, una de ellas es continua y la otra discontinua (dispersa).

Clasificación de fluidos no newtonianos (Hermida, 2000):

- ✓ Fluidos independientes del tiempo: Son los denominados plásticos, pseudoplásticos y dilatantes.
- ✓ Fluidos dependientes del tiempo: Son los denominados tixotrópicos, reopecticos

Algunos ejemplos comunes de fluidos no newtonianos son las suspensiones densas, lodos, emulsiones, fluidos biológicos, pinturas, suspensiones de arcilla, salsa de manzana, puré de plátano, pasta de tomate, mermeladas concentradas, algunos tipos de miel, etc.

Fluidos Independientes del tiempo

a) PLÁSTICOS

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral o de cedencia) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido, es decir, a este tipo de fluidos también se le conoce como viscoplásticos. La tabla N° 2.2 muestra una lista de valores para el límite elástico de algunos alimentos.

TABLA N° 2.2**VALORES DE ESFUERZO DE CEDENCIA DE ALGUNOS ALIMENTOS**

Tipo de alimento y condición	Esfuerzo de cedencia (dinas . cm -2)
Chocolate fundido	12
Crema batida	400
Goma de Guar, 0.5 % sólidos en agua	20
Goma de Guar, 1 % sólidos en agua	135
Jugo de naranja, concentrado 60°Brix	7
Puré de pera, 18.3% sólidos	35
Puré de pera, 45.7 % sólidos	339
Proteína de levadura, 10 % sólidos	0
Proteína de levadura, 25 % sólidos	42
Proteína de soya, 20 % sólidos	1271
Proteína, suero, 20 %	21
Sacarosa, 75 % en agua	0
Puré de tomate, 11 % sólidos	20
Goma de xantano, 0.5 % sólidos, en agua	20
Goma de xantano, 1.2 % sólidos, en agua	45

Fuente: (Rha, 1980)

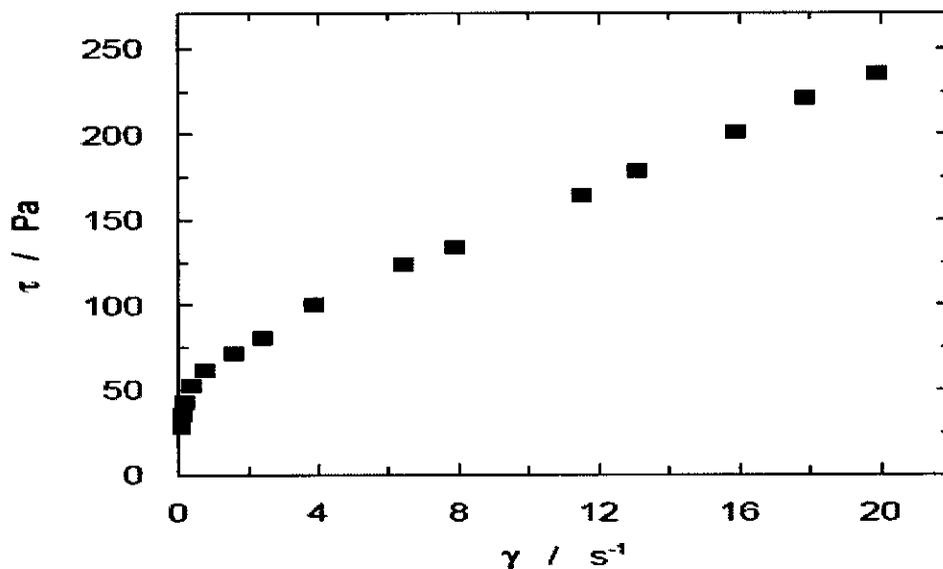
La razón por la que se comportan así los fluidos plásticos es la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada de solvatación. Están formados por dos fases, una fase dispersa formando sólidos y burbujas distribuidas en una fase continua. En estos tipos de fluidos las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión originadas por potenciales de la misma polaridad.

Los fluidos plásticos, a su vez se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo umbral. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos.

En la figura N° 2.6 se muestran los resultados experimentales del estudio reológico de una muestra de chocolate con leche, observándose un claro comportamiento incluido dentro de los plásticos de Bingham, estos datos indican que existe un cierto valor de esfuerzo umbral que necesariamente hay que superar para que el material fluya.

FIGURA N° 2.6

**INFLUENCIA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD SOBRE EL
COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA MUESTRA DE
CHOCOLATE CON LECHE. T=40 °C**



Fuente: (Steffe, 1996)

Algunos ejemplos típicos de comportamiento plástico son el chocolate, la arcilla, la mantequilla, la mayonesa, la pasta de dientes, las emulsiones, las espumas, etc.

- **PSEUDOPLÁSTICOS (SHEAR-THINNING)**

Los fluidos pseudoplásticos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se deforman lentamente, la viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de deformación, pero no del tiempo durante el que están sometidos al esfuerzo cortante. Si la velocidad es lo suficientemente rápida, la viscosidad se estabiliza en un valor pequeño, por lo tanto la viscosidad de un fluido pseudoplástico decrece conforme incrementa el gradiente de velocidad.

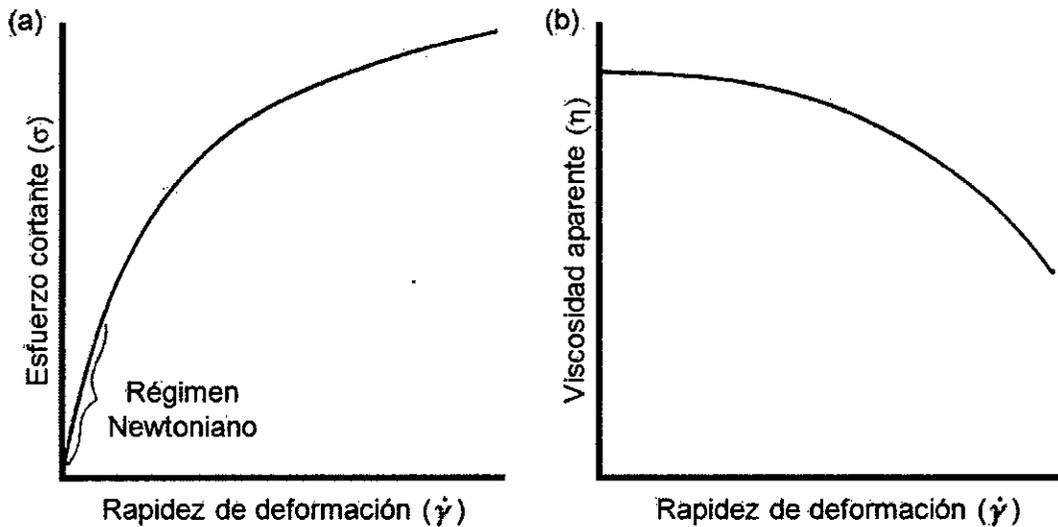
La razón de este comportamiento al flujo es que al incrementarse el gradiente de velocidad se deforma y/o se reordenan las partículas en suspensión del fluido, originándose una menor resistencia al flujo y obteniéndose como consecuencia una menor viscosidad (*López, 2003*).

El calificativo de pseudoplásticidad deriva de muestras en las que a esfuerzos cortantes bajos, corresponden velocidades de corte muy pequeñas, de manera que las gráficas se parecen mucho a las de un plástico de Bingham; es decir, exhiben un comportamiento reológico casi lineal, a este fenómeno se le conoce como "régimen Newtoniano".

La figura N° 2.7 muestra la forma en que la viscosidad aparente de un fluido pseudoplástico depende de la velocidad de corte.

FIGURA N° 2.7

FLUJO PSEUDOPLÁSTICO: (A) ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN, (B) VISCOSIDAD APARENTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN



Fuente: (Bourne, 1982)

Este tipo de comportamientos es muy común en productos de frutas y vegetales, algunos tipos de ketchup, mostaza, varias clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, polímeros fundidos, así como cosméticos y productos de baño.

▪ **DILATANTES (SHEAR-THICKENING)**

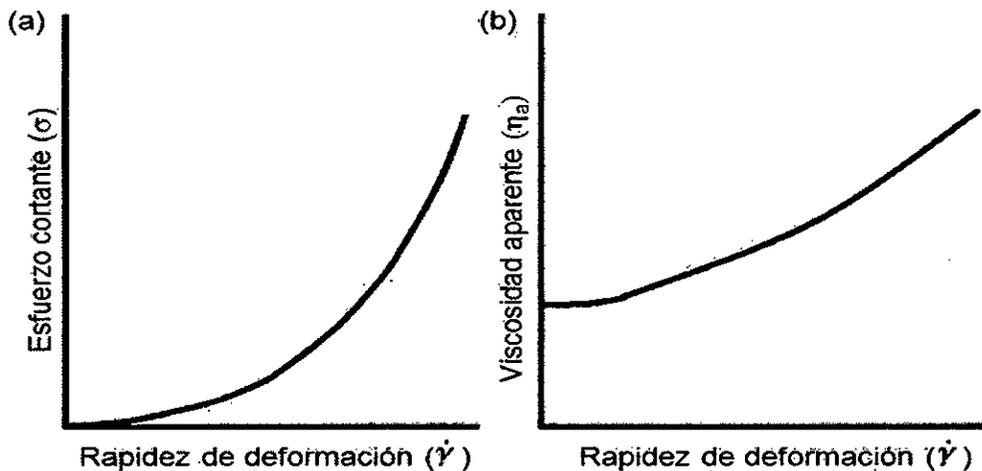
Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de deformación, se trata del fenómeno opuesto a la pseudoplasticidad. La gráfica no es lineal, pero los valores de τ y $\dot{\gamma}$ están unívocamente relacionados (espesamiento de estado estacionario).

El fenómeno de dilatancia se produce debido a la fase dispersa del fluido, en dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando

a la fase continua casi sin espacio, si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan, por esta razón la viscosidad aparente aumenta conforme aumenta la velocidad de corte, que es lo contrario a lo que ocurre en la pseudoplásticidad

FIGURA N° 2.8

FLUJO DILATANTE: (A) ESFUERZO CORTANTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN, (B) VISCOSIDAD APARENTE CONTRA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN



Fuente: (Bourne, 1982)

Algunos ejemplos son las suspensiones de almidón, algunos jarabes de chocolate, la arena mojada, dióxido de titanio, etc. Este tipo de flujos solo se encuentran en líquidos que contienen una proporción alta de partículas rígidas insolubles en suspensión.

FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

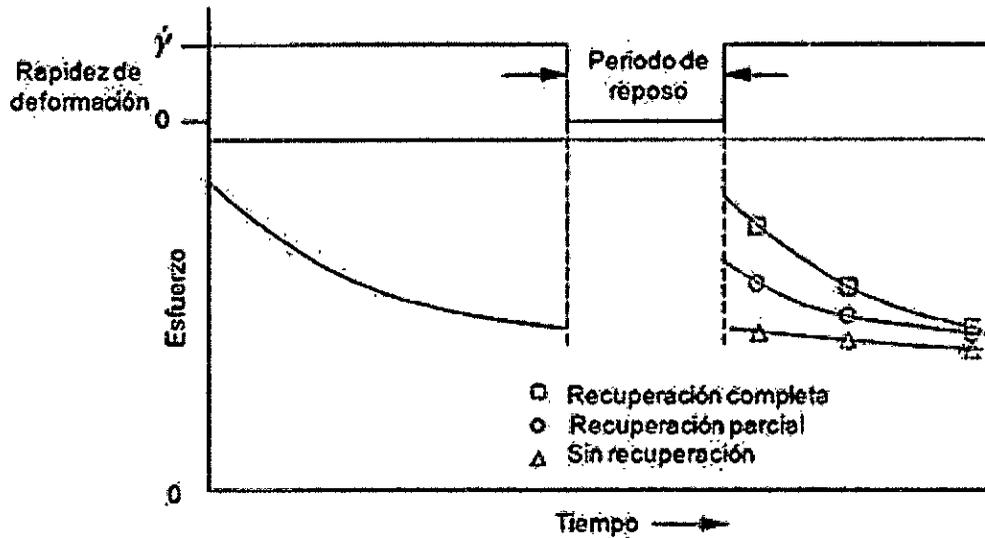
a) TIXOTRÓPICOS

En un fluido tixotrópico el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente disminuyen conforme transcurre el tiempo para una misma rapidez de deformación, pero el cambio es reversible, esto es, el fluido recobrará su estado original al eliminar la fuerza de corte (recuperación gradual cuando es removido el esfuerzo aplicado).

Este tipo de fluido se caracteriza por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo, esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas. Dichos fluidos, una vez aplicando un estado de cizallamiento, sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio, es aquí cuando parece el fenómeno de histéresis.

El rango de tixotropía se ejemplifica en la figura N°2.9 cuando un material es sometido a una velocidad de corte constante, el esfuerzo cortante disminuye con el tiempo, pero durante un periodo de reposo el material se puede recuperar completamente, recuperarse parcialmente o bien no recuperar su estructura original.

FIGURA N° 2.9
COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO OBSERVADO EN CURVAS DE DISMINUCIÓN DEL TORQUE APLICADO.



Fuente: (Steffe, 1996)

Algunos ejemplos típicos de este tipo de fluidos son: las pinturas, las tintas de impresión, algunos aceites de petróleo, el nylon, material alimenticio como la gelatina, crema, manteca vegetal, yogurt, salsa de tomate y aderezos para ensaladas, etc.

b) REOPÉCTICOS

Este tipo de fluidos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan histéresis inversa a estos últimos.

Esto es, debido a que si se aplica una fuerza se produce una deformación de enlaces intermoleculares provocando un aumento de la viscosidad, mientras que si ésta cesa se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad. Este tipo de comportamiento no es común en los alimentos, pero se presenta en una solución de almidón muy concentrada por periodos largos, por ejemplo, las soluciones concentradas de almidón y otros sólidos, también es común que se presente en alguna

D. Fluidos Viscoelásticos

Los fluidos de esta naturaleza exhiben una recuperación elástica de las deformaciones que ocurren durante el flujo, es decir, muestran propiedades tanto viscosas como elásticas (*Rao y Rizvi, 1986*). Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

Mediciones de viscoelasticidad puede causar dificultades en procesos industriales, presentes en la industria de pinturas, cosméticos y alimentos. Ejemplos de fluidos Viscoelásticos en la industria de alimentos: la crema de leche, mezclas de helados y productos congelados. La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de Maxwell.

2.2.8 Modelos de Ajustes para comportamientos Reológicos

Se han propuesto en la bibliografía numerosas ecuaciones empíricas para expresar el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos, sería deseable que tales funciones pudieran ser desarrolladas a partir de modelos matemáticos basados en la estructura molecular, pero en la actualidad las teorías moleculares no son capaces de describir satisfactoriamente el comportamiento real de materiales complejos, como suele ser habitual. Por ello, las fuentes más útiles de información Reológicas son habitualmente los modelos empíricos. A continuación se indican algunos de los modelos más utilizados de acuerdo a (*L. Quintáns, 2008*).

- **Modelo de Herschel-Bulkley**

Este modelo fue desarrollado para suspensiones no tixotrópicas de partículas atrayentes (*Holdwort, 1971*). Es una generalización del modelo de Bingham, aplicable a fluidos plásticos pseudoplásticos y plásticos dilatantes. Se basa en la expresión mostrada en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \tau &\leq \tau_0 & \dot{\gamma} &= 0 \\ \tau &> \tau_0 & \tau &= \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \end{aligned}$$

En este modelo con $n > 1$ representa un comportamiento plástico dilatante, mientras que para $n < 1$ representa un comportamiento plástico pseudoplásticos. Para $n = 1$, el modelo es equivalente al modelo de Bingham con $K = \tau_0$.

- **Modelo de Casson, Carreau y Cross**

A continuación se muestra en la tabla N°2.3 las ecuaciones correspondientes para los modelos de Casson, Carreau y Cross, posteriormente en la tabla 5 se muestran los valores de los parámetros de algunos tipos de fluidos según el modelo utilizado.

TABLA N° 2.3
ALGUNOS MODELOS DE ECUACIONES DE AJUSTE REOLOGICO
INDEPENDIENTE DEL TIEMPO

MODELO	ECUACION
Casson	$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + K_1 \cdot \gamma^{0.5}$
Carreau	$n = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot [1 + (k_1 \cdot \gamma)^2]^{(n-1)/2}$
Cross	$n = n_\infty + \frac{n_0 - n_\infty}{1 + k_1 \cdot \gamma^n}$

Fuente: R. Escudero Cadena ,2014 en la investigación titulada:
“Propiedades Reológicas de productos alimenticios derivados de
frutas y hortalizas”

TABLA N° 2.4
VALORES DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DE ALGUNOS TIPOS DE FLUIDOS

	K	n	τ_0	EJEMPLOS
Herschel-Bulkley	>0	$0 < n < \infty$	>0	Pasta de pescado
Newtonianos	>0	1	0	zumos de frutas, miel, aceite vegetal
Pseudoplásticos	>0	$0 < n < 1$	0	Puré de plátano, zumo de naranja concentrado
Dilatante	>0	$1 < n < \infty$	0	Algunos tipos de miel, disoluciones, almidón
Plástico de Bingham	>0	1	>0	Pasta de dientes, pasta de tomate

**Fuente: R. Escudero Cadena ,2014 en la investigación titulada:
 “Propiedades Reológicas de productos alimenticios derivados de frutas y hortalizas”**

- **Modelo de Eyring**

La relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación es de la siguiente forma:

$$\tau = n_0 * \sinh^{-1}(\gamma/B)$$

Es un modelo de dos parámetros n_0 y B que predice el comportamiento Pseudoplásticos para valores finitos de τ , y tiende asintóticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando la velocidad de deformación tiende a cero, en cuyo caso $\eta = n_0$. Este modelo tiene una base teórica en la teoría cinética de los líquidos (*Eyring et al, 1941*).

- **Modelo de Ellis**

Es un modelo de tres parámetros, descrito por la expresión mostrada en la siguiente ecuación. Si el parámetro α es mayor que la unidad, el modelo tiende hacia comportamiento newtoniano para valores bajos de esfuerzo cortante, si es menor que la unidad, la convergencia hacia la ley de Newton se produce a altos valores de esfuerzo cortante. En ambos casos, el valor de viscosidad dinámica límite es η_0 .

El parámetro $\tau_{1/2}$ es el valor del esfuerzo cortante para que el valor de viscosidad dinámica sea justamente la mitad de η_0

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (\tau_{r/z} / \tau_{1/2})^{\alpha-1}}$$

- **Modelo de Ostwald de Waele**

Se representa por la relación que se muestra en la siguiente ecuación y a menudo recibe el nombre de "ley de la potencia" (*Steffe; Holdsworth citados por Mukprasirt et al., 2000*).

$$\tau = k * \gamma^n$$

Es un modelo de dos parámetros: K = índice de consistencia (Pa.sn) y n = índice de comportamiento al flujo (adimensional). Para $n = 1$, el modelo representa el comportamiento newtoniano, con $\eta = K$. Por consiguiente, la desviación del valor de n de la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Para $n > 1$, el modelo sigue un comportamiento dilatante, mientras que $n < 1$ indica un comportamiento pseudoplásticos.

- **Modelo de la ley potencial truncada**

El fluido se comporta como newtoniano hasta un determinado valor de velocidad de cizalla (γ_1), a partir del cual fluye de acuerdo con el modelo de Ostwald:

$$\gamma < \gamma_1 \quad \tau = \tau_1 * ((\gamma)/\gamma_1)$$

$$\gamma > \gamma_1 \quad \tau = \tau_1 * (\gamma/\gamma_1)^n$$

Es un modelo de tres parámetros γ_1 , τ_1 y n , y resuelve la inconsistencia del modelo de Ostwald a bajas velocidades de cizalla.

- **Modelo de Sisko**

El modelo desarrollado por Sisko adopta una expresión como la que se muestra en la siguiente ecuación.

$$\eta_{ap} = K_S * \gamma^{n_s-1} + \eta_{\infty}$$

Siendo, igual que en casos anteriores, η_{ap} la viscosidad aparente, γ , el gradiente de velocidad aplicada, K_S , el índice de consistencia, n_s , el índice de comportamiento y η_{∞} , la viscosidad a gradiente infinito (**Sisko, 1958**).

Este modelo puede ser aplicado en operaciones como el bombeo de alimentos líquidos y los procesos de mezcla que implican altos gradientes de velocidad. Este modelo se puede considerar como una generalización del modelo de la potencia y que a su vez tiene una cierta componente newtoniana, siendo un modelo adecuado para sistemas en lo que bajo ciertas condiciones de operación pueda alcanzar un cierto comportamiento newtoniano

- **Modelo de Reiner-Philippoff**

Es un modelo de tres parámetros que toma la forma mostrada en la siguiente ecuación:

$$\tau = \left[n_{\infty} + \frac{n_0 - n_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_s}\right)^2} \right] \cdot \gamma$$

Representa un comportamiento estructural con viscosidad límite a baja velocidad de cizalla n_0 y a alta velocidad de cizalla n_{∞} . El parámetro τ_s representa el valor de esfuerzo cortante para el que la viscosidad aparente toma el valor medio entre n_0 y n_{∞} .

- **Modelo de Bingham**

Estos fluidos son los más simples debido a que solo difieren de los newtonianos en cuanto a que la relación lineal no pasa por el origen (**Geankoplis, 1986**). Esto se debe a que estos cuerpos no se derraman bajo el efecto de su peso; necesitan que la presión sobrepase un umbral para que comience el flujo, esto se expresa por:

$$\sigma = k \cdot \gamma + \sigma_0$$

Donde σ_0 es el esfuerzo cortante límite, por encima del cual se produce el derramamiento newtoniano.

2.2.9 Definición de términos básicos

- **COMPORTAMIENTO REOLÓGICO:** Es su comportamiento según sus características de viscosidad, densidad
- **ESFUERZO DE CORTE:** El esfuerzo cortante, de corte, de cizalla o de cortadura es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar.
- **ESFUERZO DE CEDENCIA:** es el esfuerzo que produce en un material una deformación específica, permanente y limitadora
- **FLUIDOS:** Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil.
- **FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS:** son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se deforman lentamente, la viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de deformación, pero no del tiempo durante el que están sometidos al esfuerzo cortante.
- **FLUIDOS REOPÉCTICOS:** se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan histéresis inversa a estos últimos
- **FLUIDOS TIXOTRÓPICOS:** el esfuerzo cortante y la viscosidad aparente disminuyen conforme transcurre el tiempo para una misma rapidez de deformación, pero el cambio es reversible, esto es, el fluido recobrará su estado original al eliminar la fuerza de corte
- **RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN:** es una magnitud que mide el cambio de deformación respecto al tiempo. Para problemas uniaxiales es simplemente la derivada temporal de

la deformación longitudinal, mientras que para problemas o situaciones tridimensionales se representa por un tensor de segundo rango.

- **REOGRAMAS:** es un gráfico en el que indica qué tipo de comportamiento tiene el fluido
- **VELOCIDAD DE CORTE:** la velocidad lineal de la periferia de una herramienta acoplada a una máquina herramienta o la velocidad lineal del diámetro mayor que esté en contacto con la herramienta en la pieza que se esté mecanizando en un torno.
- **VISCOSIDAD:** es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción. La viscosidad se corresponde con el concepto informal de "espesor"
- **VISCOSIDAD APARENTE :** se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos de comportamiento no lineal
- **VISCOSIDAD DINÁMICA O ABSOLUTA (μ):** es la pendiente en cada punto de la curva si es que se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante contra velocidad de deformación).
- **VISCOSIDAD CINEMÁTICA (ν):** relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

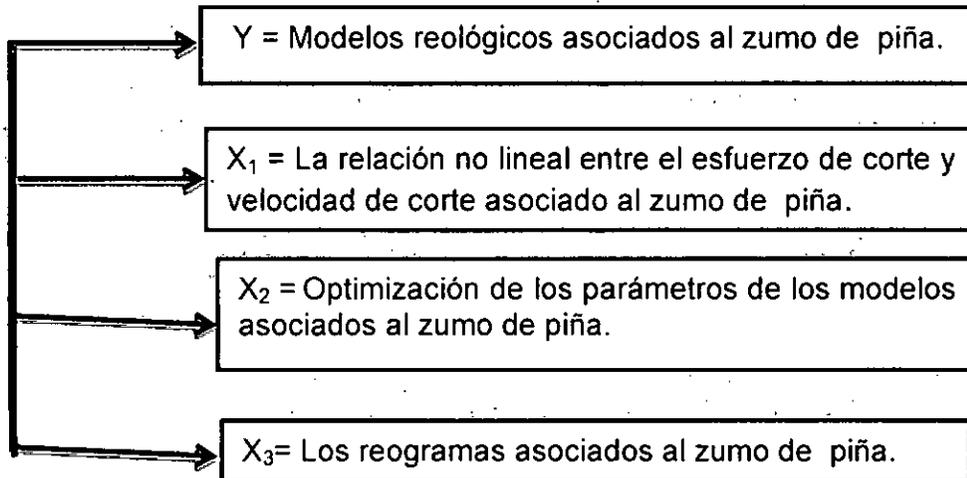
3.1 Definición de las variables de la investigación

La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal estudiando la variable a lo largo del tiempo establecido, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

Por su naturaleza, todas las variables identificadas son del tipo cualitativas. Por su dependencia Y es dependiente, y las variables X₁, X₂, X₃, son independientes.

Es decir: $Y=f(X_1, X_2, X_3)$.

FIGURA N° 3.1
RELACIÓN DE LAS VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN



Fuente: Elaboración Propia

3.2 Operacionalización de variables

CUADRO N° 3.1
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y = Modelos reológicos asociados al zumo de piña.	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento del zumo de piña.	Sumatoria de errores cuadráticos.	Correlacionando las variables X1, X2 y X3.
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X ₁ = La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de piña.	Análisis cualitativo de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	Diferencias respecto a la relación lineal.	Gráfico
X ₂ = Optimización de parámetros de los modelos asociados al zumo de piña.	Correlación cuantitativa entre los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados al zumo de piña.	Magnitud del error cuadrático	Aplicación de la relación matemática
X ₃ = Los reogramas asociados al zumo de piña.	Forma típica de los reogramas de los modelos que representan el comportamiento reológico del zumo de piña.	Forma específica de los gráficos	Gráfico.

3.3 Formulación de hipótesis

3.3.1 Hipótesis General

El zumo de piña tiene un comportamiento reológico característico de los fluidos pseudoplásticos como los de Ostwald de Waele, Herschel Bulkley, Casson, Cross entre otros.

3.3.2 Hipótesis Específicas

- a. Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de piña.
- b. La optimización de la función objetivo con los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte permite obtener los parámetros de los modelos asociados al zumo de piña.
- c. Los reogramas del zumo de piña tienen el comportamiento típico de un fluido no newtoniano específicamente al del fluido pseudoplásticos.

IV. METODOLOGIA

4.1 Caracterización taxonómica de la piña

TABLA N° 4.1

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LA PIÑA GOLDEN

TAXÓN	NOMBRE
Reino	Vegetal
Division	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Sub Clase	Zingiberidae
Orden	Bromeliales
Familia	Bromeliaceae
Genero	Ananas
Especie	Ananas Camosus

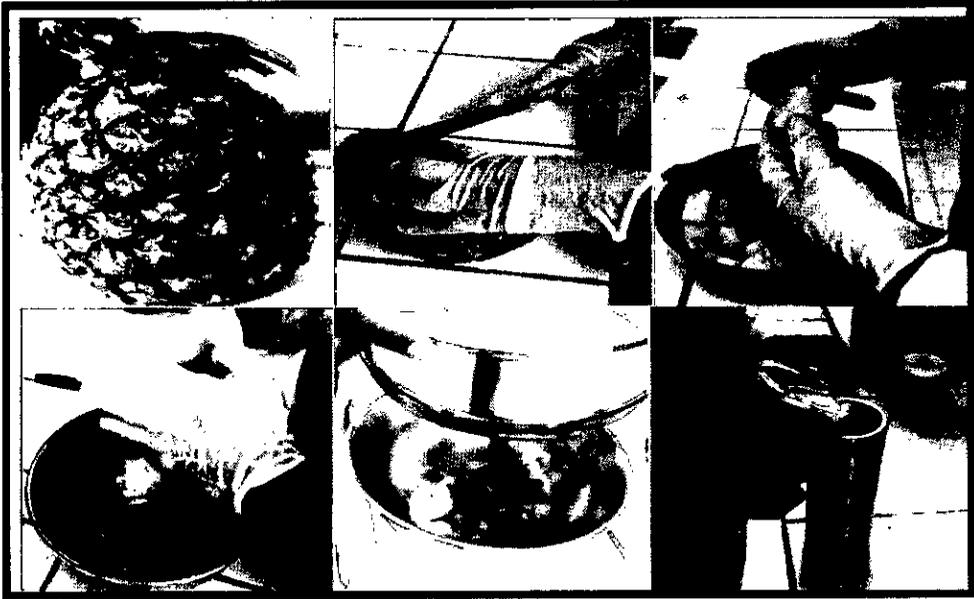
Fuente: Museo De Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos

4.2 Preparación del zumo de piña

Procedimiento:

- Selección del fruto adecuado y posteriormente lavar correctamente la piña, secarlo y pesarlo en una balanza analítica.
- Someter al fruto a su respectivo pelado y cortado en rodajas
- Exprimir la piña manualmente y colocar el zumo obtenido en vaso de precipitados.
- Procedemos al uso de los tamices de malla +140 y +200.

FIGURA N° 4.1
PREPARACION DEL ZUMO DE PIÑA



Fuente: Elaboración Propia

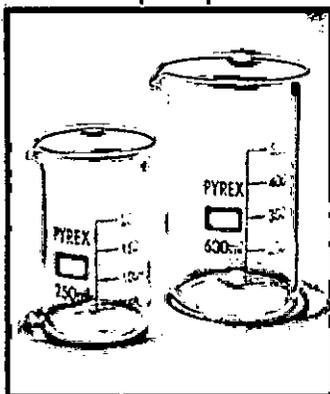
4.3 Experimento a escala piloto

El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de Investigación, ubicada en el los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

- **Materiales y Equipos**

- a. **Materiales**

Vaso precipitado



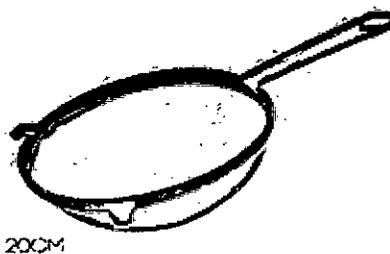
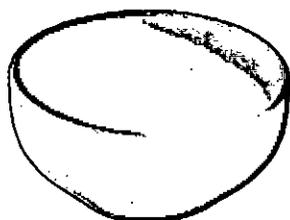
Tazones

picetas



colador

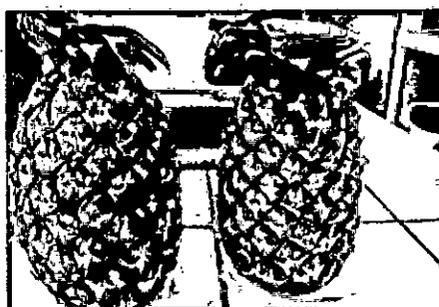
cuchillos de acero



- b. **Insumos**

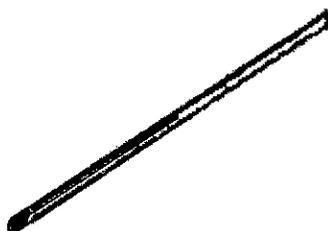
Materia Prima:

Piña Golden

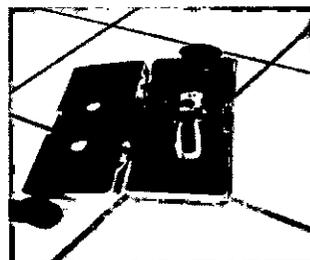


c. Equipos e Instrumentos

-Termómetro



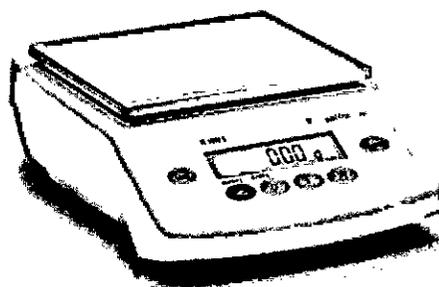
- Brixometro



-Equipo tamiz (malla +140 y +200)



Balanza Analítica



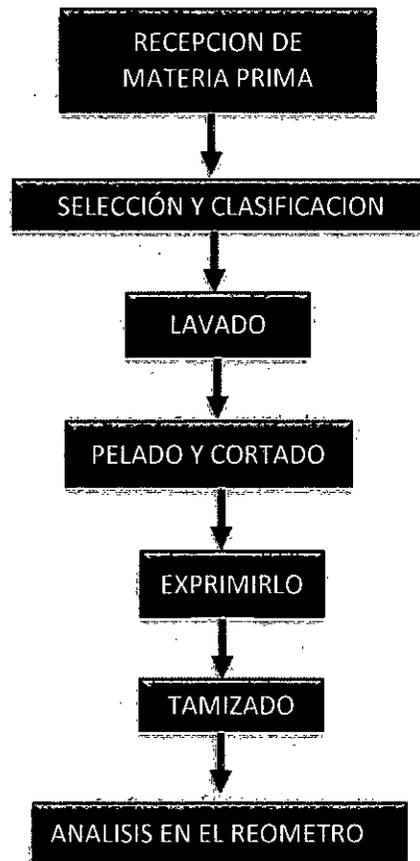
Reómetro Rheolab Q



- **Obtención del zumo de la piña y análisis fisicoquímico en el proceso de elaboración del zumo respectivo**

1. Descripción del Proceso

Se realizó en base al siguiente flujo grama



1.1. Recepción de Materia Prima

El presente trabajo tiene como finalidad dar un valor agregado a la piña, se recepcionó la piña y se pesó para conocer con cuanto de materia prima se realizara el experimento.

1.2. Selección y Clasificación

Por tratarse de elaboración de zumo, no es muy necesario realizar la selección por tamaño, sino que se consideró otros criterios tales como presencia de contaminantes físicos y químicos perceptibles a los sentidos del hombre, y el estado de madurez de la fruta, eliminando aquellas deterioradas, picadas y verdes.

1.3. Lavado

El lavado se llevó a cabo en los tazones de 50L de capacidad, con el lavado se remueven las partículas de la suciedad y los fungicidas adheridos a las cáscaras, evitando una posible fuente de contaminación por microorganismos.

1.4. Pelado y Cortado

Una vez lavada la fruta es necesario retirarle la cáscara. Esta operación se puede efectuar de manera manual con cuchillos comunes, efectuando cortes transversales en los extremos de la fruta y un corte longitudinal, para luego separar la parte comestible de la cáscara y finalmente cortamos en trozos para facilitar el siguiente paso.

1.5. Exprimir

Exprimir la piña manualmente y colocar el zumo obtenido en vaso de precipitados

1.6. Tamizado

Se utilizó el tamizador de alimentos, con dos aberturas de malla las cuales fueron +140 y +200 para concentrar el zumo, separándolo de algunos trozos pequeños de la piña.

1.7. Análisis en el reómetro

Se vertió los concentrados de zumos que pasaron a través de las mallas +140 y +200 en el envase que se coloca en el reómetro y se procede a tomar nota de los datos experimentales.

- **Caracterización fisicoquímica de la Piña Golden**

°Brix: Se realizó la medición de los °Brix del zumo de la piña fresca, con la ayuda del Brixometro

FIGURA N° 4.2
MEDICIÓN DE °BRIX DEL ZUMO DE PIÑA



Fuente: Elaboración Propia

Luego de realizar el tamizado de los zumos a través de las mallas +140 y +200 se obtuvo los siguientes resultados.

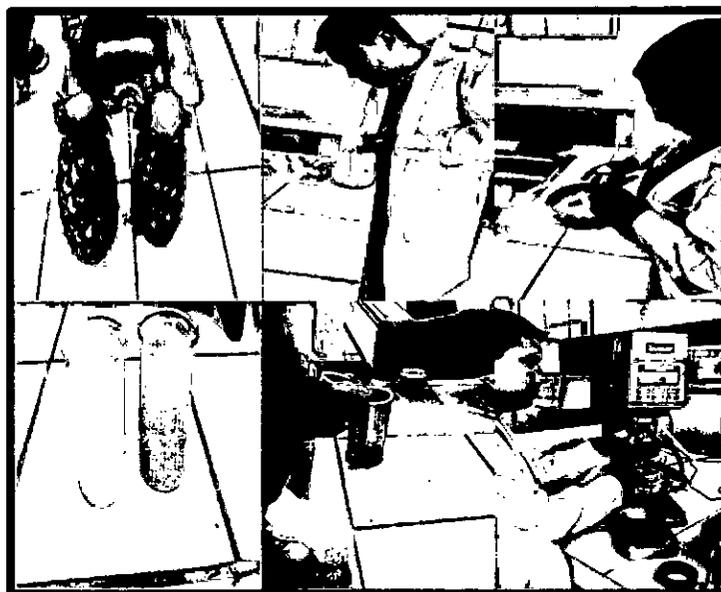
TABLA N° 4.2
ANÁLISIS A TRAVÉS DEL BRIXOMETRO PARA EL ZUMO DE PIÑA

MALLA	°Brix
+140	11.5
+200	10.5

Fuente: Elaboración Propia

- Parte experimental y obtención de datos a través del software del reómetro Rheolab QC

Figura N°4.3
EXPERIMENTACIÓN A ESCALA PILOTO



Fuente: Elaboración Propia

V.- RESULTADOS

5.1 Representación gráfica de los reportes de las propiedades Reológicas

Tabla N° 5.1:

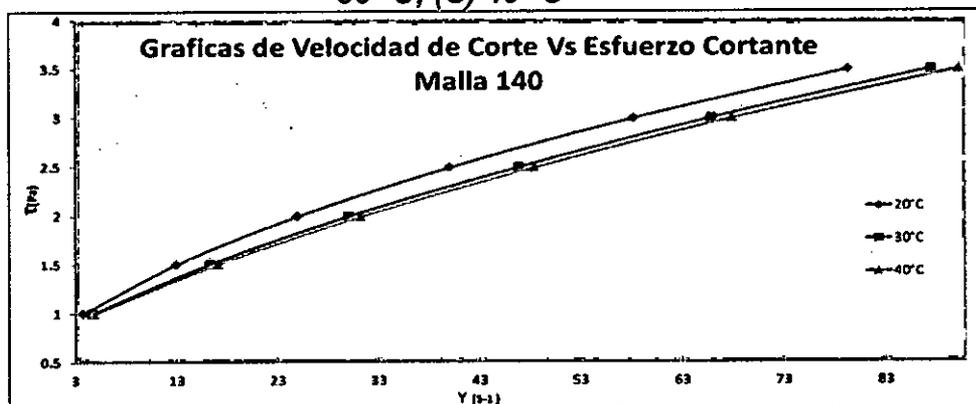
REPORTE DE LOS DATOS DE VISCOSIDAD DINÁMICA, VELOCIDAD DE CORTE Y ESFUERZO DE CORTE CON ABERTURA DE MALLA +140 A DIFERENTES TEMPERATURAS

MALLA 140								
20 ° C			30° C			40° C		
η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)	η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)	η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)
0.265	3.78	1	0.215	4.64	1	0.206	4.86	1
0.115	13	1.5	0.0918	16.3	1.5	0.0876	17.1	1.5
0.0798	25	1.99	0.0662	30.1	1.99	0.0638	31.3	1.99
0.0622	40.1	2.49	0.0531	46.9	2.49	0.0514	48.5	2.49
0.0513	58.3	2.99	0.0454	65.9	2.99	0.0439	68	2.99
0.0439	79.4	3.49	0.0398	87.5	3.49	0.0386	90.3	3.49

Fuente: Equipo Rheolab QC

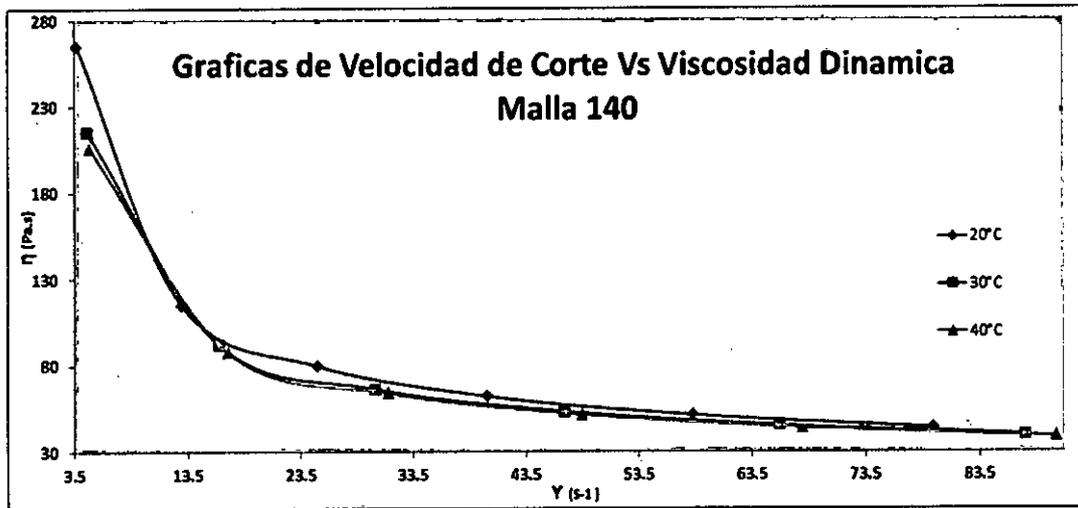
GRAFICA N° 5.1:

ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE: (A) A 20 °C; (B) 30 °C; (C) 40 °C



Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 5.2:
VISCOSIDAD DINÁMICA VS VELOCIDAD DE CORTE: (A) 20 °C; (B)
30 °C; (C) 40 °C



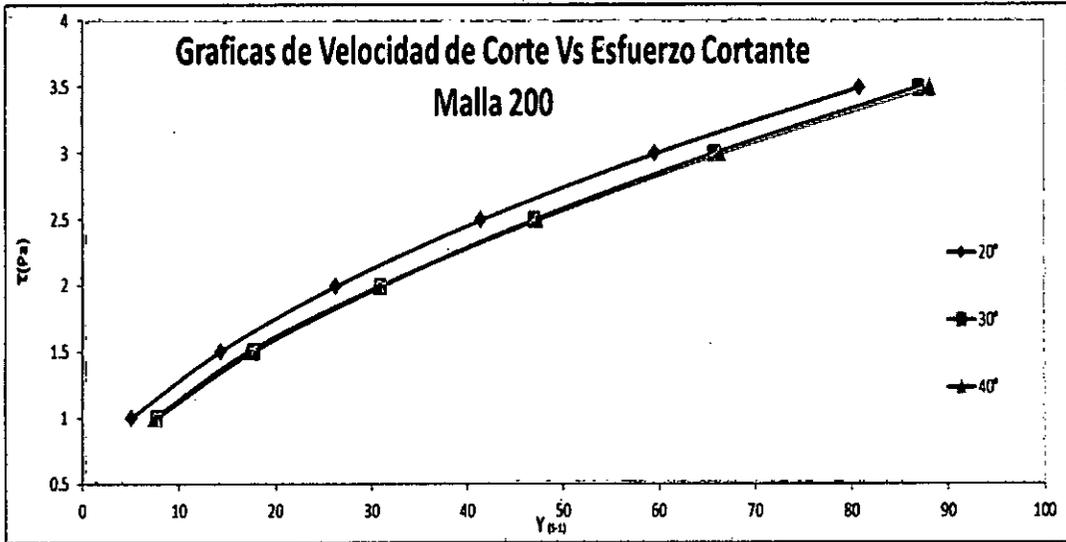
Fuente: Elaboración Propia

TABLA N° 5.2
REPORTE DE LOS DATOS DE VISCOSIDAD DINÁMICA, VELOCIDAD
DE CORTE Y ESFUERZO DE CORTE CON ABERTURA DE MALLA
+200 A DIFERENTES TEMPERATURA

MALLA 200								
20 ° C			30° C			40° C		
η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)	η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)	η (Pa.s)	$X=\dot{\gamma}$ (s-1)	$Y=\tau$ (Pa)
0.197	5.07	1	0.13	7.68	1	0.134	7.46	1
0.105	14.3	1.5	0.0847	17.7	1.5	0.0871	17.2	1.5
0.0758	26.3	1.99	0.0645	31	1.99	0.0648	30.8	1.99
0.0601	41.5	2.49	0.0531	47	2.49	0.0526	47.4	2.49
0.0502	59.6	2.99	0.0455	65.7	2.99	0.045	66.4	2.99
0.0431	80.9	3.49	0.0401	86.9	3.49	0.0396	88.1	3.49

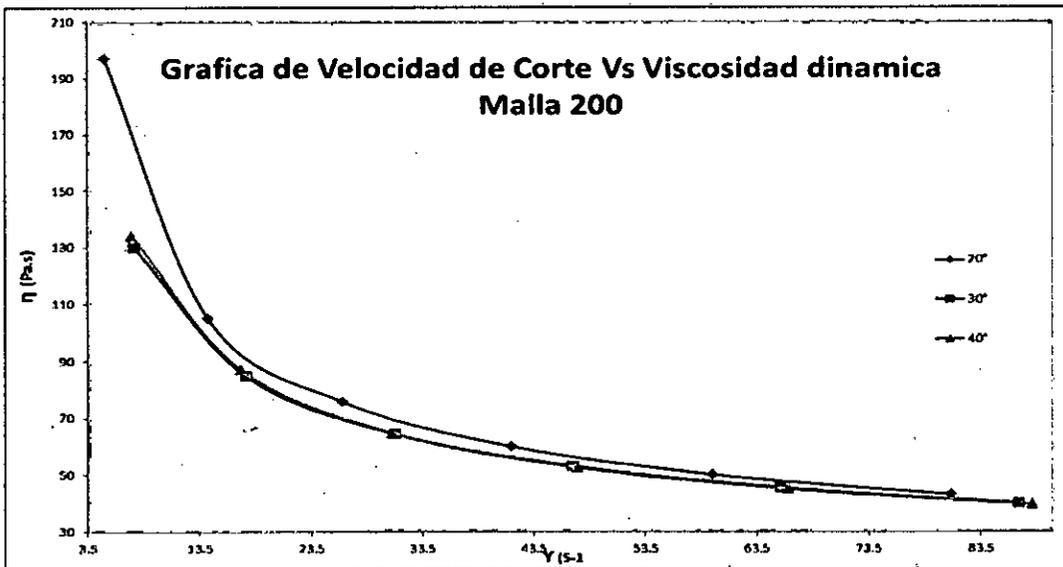
Fuente: Equipo Rheolab QC

GRAFICA N° 5.3
ESFUERZO DE CORTE VS VELOCIDAD DE CORTE: (A) A 20 °C; (B)
30 °C; (C) 40 °C



Fuente: Elaboración Propia

GRAFICA N° 5.4
VISCOSIDAD DINÁMICA VS VELOCIDAD DE CORTE: (A) 20 °C; (B)
30 °C; (C) 40 °C



Fuente: Elaboración Propia

5.2. Caracterización reologica del zumo de piña, asumiendo los modelos reológicos que se indican a continuación a través de la malla +140 y malla +200

Modelos Reológicos a través de Malla +140 y +200, con sus respectivos parámetros determinados

MODELO HERSCHEL -BULKLEY					
$\tau = t_0 + k \cdot \gamma^n$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = 0.5409 + 0.2000 \cdot \gamma^{0.6155}$	0.000295	20°	$\tau = 0.3864 + 0.2345 \cdot \gamma^{0.5883}$	0.000170
30°	$\tau = 0.6223 + 0.1275 \cdot \gamma^{0.6966}$	0.000384	30°	$\tau = 0.2345 + 0.2248 \cdot \gamma^{0.5982}$	4.95E-05
40°	$\tau = 0.6147 + 0.1249 \cdot \gamma^{0.6967}$	0.000645	40°	$\tau = -0.0054 + 0.3463 \cdot \gamma^{0.5143}$	0.003143

MODELO OSTWALD					
$\tau = k \cdot \gamma^n$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = 0.4883 \cdot \gamma^{0.4459}$	0.023310	20°	$\tau = 0.4295 \cdot \gamma^{0.4747}$	0.008812
30°	$\tau = 0.4125 \cdot \gamma^{0.4729}$	0.03736	30°	$\tau = 0.3295 \cdot \gamma^{0.5272}$	2.61E-03
40°	$\tau = 0.4002 \cdot \gamma^{0.4765}$	0.03808	40°	$\tau = 0.4508 \cdot \gamma^{0.4533}$	0.068792

MODELO CASSON					
$\tau = (t_0^{0.5} + k \cdot \gamma^{0.5})^2$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = (0.3777 + 0.1230 \cdot \gamma^{0.5})^2$	0.007945	20°	$\tau = (0.7490 + 0.1261 \cdot \gamma^{0.5})^2$	0.012699
30°	$\tau = (0.3059 + 0.1209 \cdot \gamma^{0.5})^2$	0.001646	30°	$\tau = (0.6771 + 0.1292 \cdot \gamma^{0.5})^2$	1.18E-02
40°	$\tau = (0.2981 + 0.1195 \cdot \gamma^{0.5})^2$	0.001824	40°	$\tau = (0.6922 + 0.1267 \cdot \gamma^{0.5})^2$	0.0127409

MODELO ELLIS					
$\tau = \frac{n_0}{1 + (t_1 \cdot \gamma)^{(\alpha-1)}}$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = \frac{17.87725}{1 + (0.000738 \cdot \gamma)^{-0.59917}}$	0.039589	20°	$\tau = \frac{19.4282}{1 + (0.0007 \cdot \gamma)^{-0.5411}}$	0.018792
30°	$\tau = \frac{22.56154}{1 + (0.000427 \cdot \gamma)^{-0.52642}}$	0.052687	30°	$\tau = \frac{13.1602}{1 + (0.0023 \cdot \gamma)^{-0.6428}}$	1.42E-02
40°	$\tau = \frac{28.31714}{1 + (0.000249 \cdot \gamma)^{-0.52304}}$	0.050489	40°	$\tau = \frac{14.6810}{1 + (0.0016 \cdot \gamma)^{-0.6107}}$	0.012765

MODELO EYRING					
$\tau = n_0 * \sinh^{-1}(\gamma/B)$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = 1.0374 * \sinh^{-1}(0.1496 * \gamma)$	0.25855	20°	$\tau = 1.0375 * \sinh^{-1}(0.1469 * \gamma)$	0.15657
30°	$\tau = 1.0129 * \sinh^{-1}(0.1432 * \gamma)$	0.26147	30°	$\tau = 1.2108 * \sinh^{-1}(0.0904 * \gamma)$	0.10096
40°	$\tau = 1.0263 * \sinh^{-1}(0.1335 * \gamma)$	0.26219	40°	$\tau = 1.1708 * \sinh^{-1}(0.0974 * \gamma)$	0.10467

MODELO BINGHAM					
$\tau = \sigma_0 + k * \gamma$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\tau = 1.0630 + 0.0322 * \gamma$	0.08703	20°	$\tau = 1.0224 + 0.0321 * \gamma$	0.08779
30°	$\tau = 1.0106 + 0.0295 * \gamma$	0.05099	30°	$\tau = 1.2086 + 0.0262 * \gamma$	0.20476
40°	$\tau = 1.0630 + 0.0288 * \gamma$	0.04926	40°	$\tau = 0.9486 + 0.0302 * \gamma$	0.07123

MODELO CARREAU					
$n = n_{\infty} + (n_0 - n_{\infty}) * [1 + (k_1 * \gamma)^2]^{(n-1)/2}$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\eta = 100.5379 - 99.5492 * (1 + 0.0049 * \gamma^2)^{-0.007164}$	0.01419	20°	$\eta = 103.2838 - 101.8958 * (1 + 1.5E - 05 * \gamma^2)^{-0.23971}$	0.585220
30°	$\eta = 99.9036 - 98.9175 * (1 + 0.0027 * \gamma^2)^{-0.008147}$	0.01279	30°	$\eta = 100.8762 - 99.4363 * (1 + 1.41E - 05 * \gamma^2)^{-0.23221}$	0.49381
40°	$\eta = 58.9731 - 57.5094 * (1 + 1.06E - 05 * \gamma^2)^{-0.4862}$	0.49935	40°	$\eta = 84.1430 - 82.6920 * (1 + 1.85E - 05 * \gamma^2)^{-0.20869}$	0.492420

MODELO CROSS					
$n = n_{\infty} + \frac{n_0 - n_{\infty}}{1 + k_1 * \gamma^n}$					
TEMPERATURA	MALLA +140	Σ	TEMPERATURA	MALLA +200	Σ
20°	$\eta = 35.2403 - \frac{34.6478}{1 + 0.0048 * (\gamma)^{0.67162}}$	0.00001	20°	$\eta = 35.2698 - \frac{34.8161}{1 + 0.0055 * (\gamma)^{0.6481}}$	4.456 * E - 05
30°	$\eta = 35.2207 - \frac{34.5539}{1 + 0.0030 * (\gamma)^{0.75709}}$	0.00015	30°	$\eta = 35.2686 - \frac{34.9415}{1 + 0.0051 * (\gamma)^{0.6657}}$	0.000114
40°	$\eta = 35.2208 - \frac{34.5563}{1 + 0.00289 * (\gamma)^{0.76143}}$	0.00028	40°	$\eta = 35.2550 - \frac{34.9229}{1 + 0.0053 * (\gamma)^{0.6541}}$	0.000466

Cabe recalcar que la determinación de los parámetros de los modelos elegidos se muestran adjuntos en el anexo de la presente tesis para su mayor comprensión.

VI.-DISCUSION DE RESULTADOS

Se considera que un modelo es válido cuando la optimización de la función objetivo, que es la sumatoria de las diferencias entre el valor experimental y el valor estimado, elevado al cuadrado tiende a cero.

De los modelos con los cuales se realizó las corridas experimentales, los modelos de Herschel-Bulkey y Cross, presentan el valor de la sumatoria del error cuadrático el cual tiende a cero, por lo que se considera que estos modelos describen adecuadamente el comportamiento no newtoniano del zumo de piña a 3 diferentes temperaturas de prueba.

A la vez luego de analizar los reogramas que están adjuntos en el anexo podemos indicar que se trata de un fluido plástico real, y optamos por el modelo reologico no newtoniano de Herschel-Bulkey, dado que la gráfica velocidad de deformación Vs (Valor estimado – valor experimental), tienen una desviación mínima.

VII.-CONCLUSIONES

- 1) Se obtuvo de forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para el zumo de piña cuando fue tamizado por la malla +140 (106 μm) y +200 (75 μm) a las temperaturas de 20 °C, 30°C y 40°C.
- 2) Se han analizado 8 modelos de fluido no newtoniano independiente del tiempo, obteniendo que solo los modelos de Herschel-Bulkey y Cross , lograron el propósito de una buena correlación, cuya validez se determinó con la optimización de la función objetivo
- 3) Se obtuvieron los parámetros reológicos de los 2 modelos que cumplen satisfactoriamente con el análisis estadístico.
- 4) Se elaboraron los reogramas del zumo de piña a las temperaturas de 20°C, 30°C y 40°C, los cuales nos sirvieron para poder determinar cuáles son los modelos que se ajustan al modelo requerido.

VIII.-RECOMENDACIONES

- 1) Extender el estudio orientado a los cambios en la estructura interna que afectan a las mediciones del esfuerzo y velocidad de corte
- 2) Realizar la parte experimental en distintos tipos de malla y a otras temperaturas para ver el comportamiento de los parámetros obtenidos respecto a las condiciones de trabajo del material.
- 3) Hacer una mayor cantidad de experimentos para corroborar si otros modelos no correlacionados también pueden ser considerados dentro del grupo mencionado en las conclusiones.

IX.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AGUILAR, A., MATOS-CHAMORRO, A. Influencia de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus Indica*. Revista en investigación en ciencia y tecnología de alimentos. Vol. 1. N°. 1. (2010).
- 2) ALBA, M. Estudio sobre algunos aspectos de producción e industrialización de murta. Proyecto Desarrollo Sector Costa. Fondo Nacional Desarrollo Regional. Osorno, Chile. 30 p.(1977.)
- 3) BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; IBARZ, A y PELEG, M. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión. Alimentaria. 241, 39-89. (1993).
- 4) BARNES, A.H.. An examination of the use of rotational viscometers for the quality control of non-newtonian liquid products in factories. Appl. Rheol. 11(2):82-101. (2001)
- 5) BOURNE,M.C .Food Texture and Viscosity Concept and Measurement. Academic Press, New York, 325 p. (1982.)
- 6) BRENNAN, J.G., BUTTERS, J.R., COWELL, N.D. Y LILLY, A.E.V. En: Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. Ed. por: Editorial Acribia, Zaragoza, España. (1980).
- 7) CABRAL R., TELIS-ROMERO J., TELIS V., GABAS A. Y FINZER J. Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. J Food Eng.; 80 (4): 1096 1106. (2007).
- 8) CASTRO, E. Reología. Edición Digital. Departamento de Ciencias de los Alimentos y Tecnología Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Chile. (1993).

- 9) CORONADO, M., & ROSALES, R. Elaboración de Mermeladas: Procesamiento de Alimentos Para Pequeñas y Micro Empresas Agroindustriales. Lima, Perú: Centro de Investigación, Educación y Desarrollo. (2001).
- 10) Elliot, J. H., y Green, C. E., Modification of food characteristics with cellulose hydrocoloids. II The modified Bingham body-A useful rheological model. Journal of Texture Studies. pp. 194-205. (1972).
- 11) FALGUERA, V. & IBARZ, A. Rheological Behavior of Tomato Juice: Steady- State Shear and Time-Dependent Modeling. Food Bioprocess Technol.(2010).
- 12) HERMIDA, B. Fundamentos de Ingeniería en Procesos Agroalimentarios. Colección Tecnología de Alimentos Serie. Editorial Mundi-Prensa libros. Madrid, España. (2000).
- 13) MARTÍNEZ, L. R., Efecto de la velocidad de corte en la viscosidad de la papilla de zanahoria casera e industrial. Tesis que para obtener el grado de licenciatura. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas. Xalapa, Ver. (2013).
- 14) QUINTÁNS, L. Reología de productos alimentarios. Tesis para grado de Doctora, Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España. (2008).
- 15) RUÍZ, S., HERNÁNDEZ, J., AULEDA, J. & RAVENTÓS, M. Viscosidad de jugo de manzana y melocotón y soluciones de sacarosa en el intervalo de 4 a -6 °C. Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria. Bogotá (Colombia). (2007).
- 16) Ruiz Y., Sánchez J., Hernández E., Auleda J., y Raventós M. Viscosidad de zumos comerciales de melocotón, manzana y pera a temperaturas cercanas a la congelación. Rev. AFINIDAD LXVI pp. 115 ± 118. . (2010).

- 17) SAIN, M., PANTHAPULAKKAL, S. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products* 23:1-8. (2006).
- 18) Sánchez, J., Ruiz, Y., J.M. Auleda, E. Hernández y M. Raventós .Review. Freeze concentration in the fruit juices industry. *Food Science and Technology International*. 15(4):303_315. (2009).
- 19) VILLARÁN, M. C. Estudio de la influencia de la temperatura en el comportamiento reológico de mermeladas de albaricoque (*Prunus armeniaca*), arándano (*Vaccinium myrtillus*) y escaramujo (*Rosa canina*). Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Farmacia. Universidad del país Vasco. *Food Science and Technology International*. (1997).
- 20) <http://revista.consumer.es/web/es/20041001/actualidad/analisis1/69236.php>

ANEXOS

A.1 Matriz de consistencia

DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS REOLÓGICOS ASOCIADOS AL ZUMO DE PIÑA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son los modelos reológicos asociados al zumo de piña?	Determinar los modelos reológicos asociados al zumo de piña.	El zumo de piña tiene un comportamiento reológico característico de los fluidos pseudoplásticos como los de Ostwald de Waele, Herschel Bulkley, Casson y otros.	Y = Modelos reológicos asociados al zumo de piña.	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento del zumo de piña.	Sumatoria de error cuadrático	Correlacionando las variables X1, X2 y X3.
SUB – PROBLEMA	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a. ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte determinado experimentalmente para el zumo de piña?	a. Obtener en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para el zumo de piña.	Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de piña.	X ₁ = La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de piña.	Análisis cualitativo de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	Diferencias respecto a la relación lineal.	Gráfico
b. ¿Cómo debe ser la correlación no lineal de los datos experimentales conducentes a obtener los parámetros reológicos asociados al zumo de piña?	b. Obtener los parámetros reológicos de los modelos asociados al zumo de piña mediante el método de optimización de función objetivo.	La optimización de la función objetivo con los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte permite obtener los parámetros de los modelos asociados al zumo de piña.	X ₂ = Optimización de los parámetros de los modelos asociados al zumo de piña.	Correlación cuantitativa entre los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados al zumo de piña.	Magnitud del error cuadrático	Aplicación de la relación matemática
c. ¿Cómo son los reogramas asociados al zumo de piña a temperaturas diversas?	c. Elaborar los reogramas asociados al zumo de piña a las temperaturas de prueba.	Los reogramas del zumo de piña tienen el comportamiento típico de un fluido no newtoniano específicamente al del fluido pseudoplásticos.	X ₃ = Los reogramas asociados al zumo de piña.	Forma típica de los reogramas de los modelos que representan el comportamiento reológico del zumo de piña.	Forma específica de los gráficos.	Gráfico.

**GRAFICOS OBTENIDOS A PARTIR DEL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS
OPTIMOS CON CADA UNO DE LOS MODELOS REOLOGICOS.
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS ESFUERZO CORTANTE
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS RESIDUALES**

MALLA 140											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
0.25	1.5	1	0.272	0.49	0.71	0.93	1.15	1.37	1.59	1.81	2.03
0.137	1.1	1.5	0.298	0.52	0.74	0.96	1.18	1.4	1.62	1.84	2.06
0.078	0.7	1.9	0.324	0.54	0.76	0.98	1.2	1.42	1.64	1.86	2.08
0.042	0.3	2.3	0.35	0.56	0.78	1.0	1.22	1.44	1.66	1.88	2.1
0.031	0.1	2.7	0.376	0.58	0.8	1.02	1.24	1.46	1.68	1.9	2.12
0.024	0.05	3.1	0.402	0.6	0.82	1.04	1.26	1.48	1.7	1.92	2.14

MALLA 200											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
0.27	1.57	1	0.28	0.5	0.72	0.94	1.16	1.38	1.6	1.82	2.04
0.14	1.13	1.5	0.306	0.52	0.74	0.96	1.18	1.4	1.62	1.84	2.06
0.079	0.71	1.9	0.332	0.54	0.76	0.98	1.2	1.42	1.64	1.86	2.08
0.043	0.31	2.3	0.358	0.56	0.78	1.0	1.22	1.44	1.66	1.88	2.1
0.032	0.11	2.7	0.384	0.58	0.8	1.02	1.24	1.46	1.68	1.9	2.12
0.025	0.06	3.1	0.41	0.6	0.82	1.04	1.26	1.48	1.7	1.92	2.14

MODELO DE EYRING

$$y = A \arcsin h \left(\frac{1}{B} \times x \right)$$

MALLA 140											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
0.27	1	0.67941	-0.27954	0.10099	A= 0.00731479	B= 4.03631347					
17	1.5	1.00941	0.30791	0.07976							
25	1.99	1.19753	0.28791	0.07130							
40.1	2.49	1.41854	0.14234	0.02770							
58.3	2.99	1.67113	-0.01184	0.00716							
79.4	3.49	1.97793	-0.22225	0.00791							

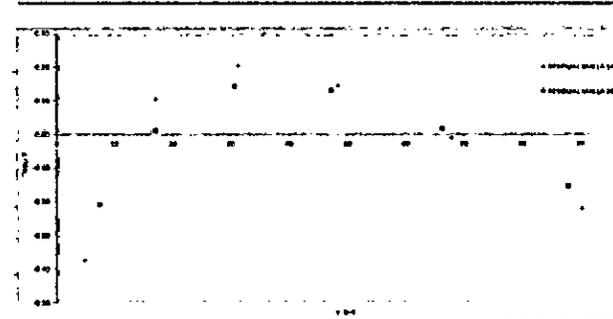
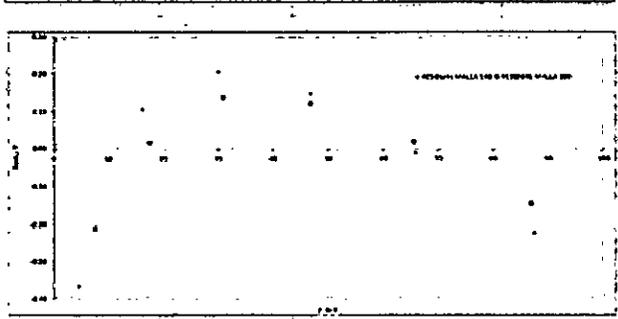
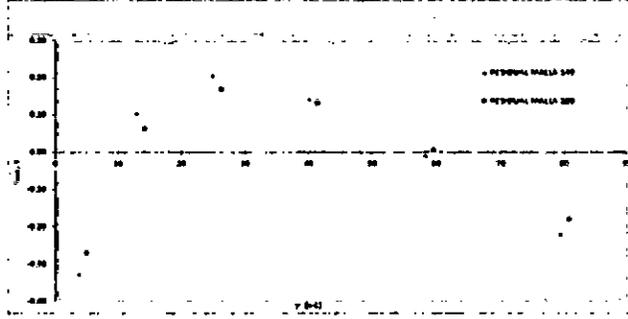
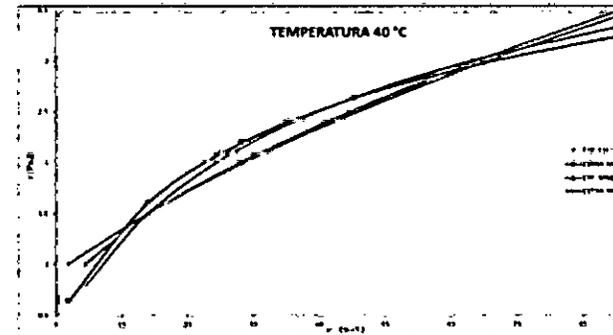
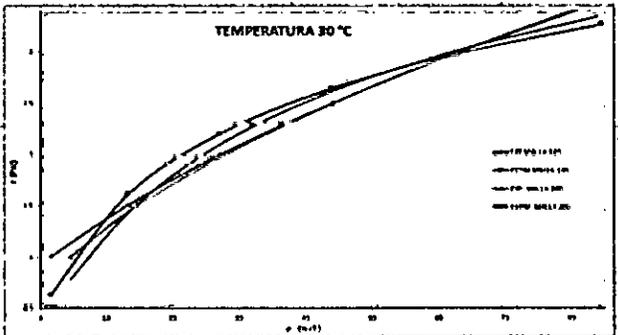
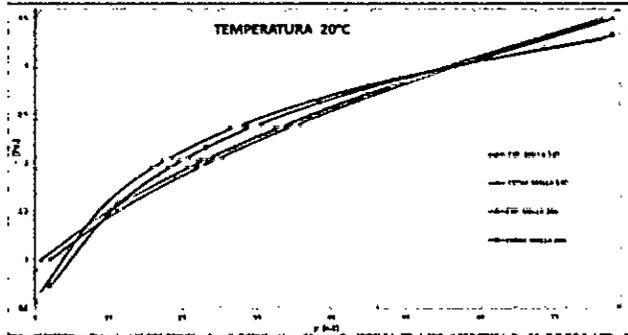
MALLA 140											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
4.64	1	0.611209	-0.360791	0.13007	A= 1.01290	B= 6.7075481					
16.3	1.5	1.020274	0.104074	0.010911							
30.1	1.99	1.195168	0.205168	0.042074							
46.9	2.49	1.676617	0.145617	0.021497							
65.9	2.99	2.078414	-0.011540	0.007134							
87.5	3.49	2.543371	-0.275429	0.00908							

MALLA 140											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
4.26	1	0.676278	-0.171277	0.119668	A= 1.02678	B= 7.470439					
17.1	1.5	1.004530	0.104530	0.01047							
31.8	1.99	1.193221	0.203221	0.041340							
45.5	2.49	1.634654	0.144654	0.02067							
68	2.99	2.078113	-0.011688	0.007137							
90.8	3.49	2.540581	-0.222943	0.009258							

MALLA 200											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
5.07	1	0.728101	-0.271899	0.07895	A= 0.00737053	B= 4.03631347					
34.3	1.5	1.306020	0.000029	0.007576							
36.4	1.99	1.164412	0.164412	0.02770							
43.5	2.49	1.638133	0.138133	0.026875							
59.6	2.99	1.991241	0.022241	0.007075							
80.9	3.49	1.932728	-0.022228	0.007077							

MALLA 200											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
7.68	1	0.785308	-0.214692	0.048973	A= 1.121012	B= 11.00079					
17.7	1.5	1.513441	0.013441	0.007071							
31	1.99	1.170405	0.115405	0.018217							
47	2.49	1.608192	0.118192	0.014064							
65.7	2.99	1.906239	0.016239	0.007064							
86.4	3.49	1.341251	-0.168749	0.02126							

MALLA 200											
Y (Pa)	Vel (Pa)	Yerr	Yerr-1	Yerr-2	Yerr-3	Yerr-4	Yerr-5	Yerr-6	Yerr-7	Yerr-8	Yerr-9
7.48	1	0.780024	-0.209976	0.048086	A= 1.170876	B= 10.15824					
17.2	1.5	1.507035	0.007035	0.007075							
30.8	1.99	1.176889	0.176889	0.019599							
47.4	2.49	1.618016	0.168016	0.014108							
66.4	2.99	1.909721	0.015071	0.007076							
85.1	3.49	1.313125	-0.156875	0.024610							



**DISCUSION DE RESULTADOS DE LOS GRAFICOS OBTENIDOS A PARTIR
DEL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CON CADA UNO DE LOS
MODELOS REOLOGICOS OBSERVADOS ANTERIORMENTE.
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS ESFUERZO CORTANTE
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS RESIDUALES**

En los reogramas que se presentaron en las páginas anteriores de 6 distintos modelos, entre los que están: Bingham, Eyring, Casson, Herschel-Bulkey, Ellis y Ostwald a 2 tipos de abertura de malla y 3 temperaturas distintas se observa que:

- En los dos primeros Modelos los cuales son Eyring y Bingham, las curvas que se aprecian en las gráficas, no llevan mucha similitud, esto debido a que los datos obtenidos no se ajustan adecuadamente a dichos modelos ni método matemático elegido como resolución.
- En los siguientes reogramas que son los modelos de Casson, Herschel-Bulkey, Ellis y Ostwald se nota que las curvas de las gráficas son muy similares, por no decir superpuestas, pero no se puede decir que cumplen como valor óptimo, y viendo la sumatoria de error cuadrático, se nota que solo cumple el modelo de Herschel-Bulkey.
- No se graficó los modelos de Cross y Carreau, debido a su complejidad con los datos, estos se graficaron teniendo en cuenta los datos de veloc. de deformación Vs. Visc. aparente, que se mostrara más adelante.

**GRAFICOS OBTENIDOS A PARTIR DEL CÁLCULO DE LOS
PARAMETROS OPTIMOS CON CADA UNO DE LOS MODELOS
REOLOGICOS.**

VELOCIDAD DE DEFORMACION VS VISCOSIDAD APARENTE

VELOCIDAD DE DEFORMACION VS RESIDUALES

**DISCUSION DE RESULTADOS DE LOS GRAFICOS OBTENIDOS A PARTIR
DEL CÁLCULO DE LOS PARAMETROS OPTIMOS CON CADA UNO DE LOS
MODELOS REOLOGICOS OBSERVADOS ANTERIORMENTE.
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS VISCOSIDAD APARENTE
VELOCIDAD DE DEFORMACION VS RESIDUALES**

De manera similar, en los reogramas que se presentaron en las páginas anteriores de los 8 distintos modelos, entre los que están: Herschel-Bulkey, Ostwald, Casson, Ellis, Carreau, Cross, Bingham, Eyring a 2 tipos de abertura de malla y 3 temperaturas distintas se observa que:

- En los seis primeros Modelos los cuales son, Herschel-Bulkey , Ostwald, Casson , Ellis, Carreau y Cross las curvas que se aprecian en las reogramas, llevan mucha similitud, pero visualizando la sumatoria de errores cuadráticos en cada uno de ellos, vemos que solo cumplen el modelo de Herschel-Bulkey y Cross.
- En los siguientes reogramas que son Eyring y Bingham las curvas de forma experimental no se asemejan al estimado, debido a que no cumplen con el método matemático elegido para hallar los valores óptimos de solución.

MODELO	T (°C)	PARAMETROS A TRAVES DE MALLA +140										R ²
		τ_0	k	n	μ_0	$\tau_{1/2}$	α	n_0	B	σ_0	n_∞	
HERSCHEL BULKEY $\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n$	20°	0.5409	0.2000	0.6155	-	-	-	-	-	-	-	0.99971
	30°	0.6223	0.1275	0.6966	-	-	-	-	-	-	-	0.99962
	40°	0.6147	0.1249	0.6967	-	-	-	-	-	-	-	0.99936
CROSS $n = n_\infty + \frac{n_0 - n_\infty}{1 + k_1 \cdot \gamma^n}$	20°	-	0.0048	0.6716	-	-	-	69.8881	-	-	35.2403	0.99999
	30°	-	0.0030	0.7571	-	-	-	69.7746	-	-	35.2207	0.99985
	40°	-	0.0029	0.7614	-	-	-	69.7771	-	-	35.2208	0.99972
CASSON $\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + K_1 \cdot \gamma^{0.5}$	20°	0.6146	0.123	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99206
	30°	0.5531	0.1209	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99835
	40°	0.5460	0.1195	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99818
OSTWALD $\tau = k \cdot \gamma^n$	20°	-	0.4883	0.4459	-	-	-	-	-	-	-	0.97669
	30°	-	0.4125	0.4729	-	-	-	-	-	-	-	0.96264
	40°	-	0.4002	0.4765	-	-	-	-	-	-	-	0.96192
ELLIS $\mu = \frac{\mu_0}{1 + ((\tau - (\tau/z)) / \tau_0 (1/2))^\alpha (\alpha - 1)}$	20°	-	-	-	17.8772	0.0007	0.4908	-	-	-	-	0.96041
	30°	-	-	-	22.5615	0.0004	0.4736	-	-	-	-	0.94731
	40°	-	-	-	28.3171	0.0002	0.4770	-	-	-	-	0.94951
EYRING $\tau = n_0 \cdot \sinh^{-1}(\gamma/B)$	20°	-	-	-	-	-	-	1.0374	6.6845	-	-	0.74145
	30°	-	-	-	-	-	-	1.0129	6.9832	-	-	0.73853
	40°	-	-	-	-	-	-	1.0263	7.4906	-	-	0.73781
BINGHAM $\sigma = k \cdot \gamma + \sigma_0$	20°	-	0.0322	-	-	-	-	-	-	1.0630	-	0.91297
	30°	-	0.0295	-	-	-	-	-	-	1.0106	-	0.94901
	40°	-	0.0288	-	-	-	-	-	-	1.0630	-	0.95074
CARREAU $n = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot [1 + (k_1 \cdot \gamma)^2]^{(n-1)/2}$	20°	-	0.0700	0.9857	-	-	-	0.9887	-	-	100.5379	0.98581
	30°	-	0.0520	0.9837	-	-	-	0.9861	-	-	99.9036	0.98721
	40°	-	0.0024	0.0276	-	-	-	1.4637	-	-	58.9731	0.50065

MODELO	T (°C)	PARAMETROS A TRAVES DE MALLA +200										R^2
		τ_0	k	n	μ_0	$\tau_{1/2}$	α	n_0	B	σ_0	n_∞	
HERSCHEL BULKEY $\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n$	20°	0.3864	0.2345	0.5883	-	-	-	-	-	-	-	0.99983
	30°	0.2345	0.2248	0.5982	-	-	-	-	-	-	-	0.99995
	40°	-0.0054	0.3463	0.5143	-	-	-	-	-	-	-	0.99686
CROSS $n = n_\infty + \frac{n_0 - n_\infty}{1 + k_1 \cdot \gamma^n}$	20°	-	0.0055	0.6418	-	-	-	70.0859	-	-	35.2698	0.99996
	30°	-	0.0051	0.6657	-	-	-	70.2101	-	-	35.2686	0.99989
	40°	-	0.0053	0.6541	-	-	-	70.1779	-	-	35.2550	0.99953
CASSON $\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + K_1 \cdot \gamma^{0.5}$	20°	0.8654	0.1261	-	-	-	-	-	-	-	-	0.98730
	30°	0.8229	0.1292	-	-	-	-	-	-	-	-	0.99882
	40°	0.8320	0.1267	-	-	-	-	-	-	-	-	0.98726
OSTWALD $\tau = k \cdot \gamma^n$	20°	-	0.4295	0.4747	-	-	-	-	-	-	-	0.99119
	30°	-	0.3295	0.5272	-	-	-	-	-	-	-	0.99739
	40°	-	0.4508	0.4533	-	-	-	-	-	-	-	0.93121
ELLIS μ_0 $\mu = \frac{\mu_0}{1 + ((\tau(r/z) / \tau(1/2))^\alpha - 1)}$	20°	-	-	-	19.4282	0.0007	0.4589	-	-	-	-	0.98121
	30°	-	-	-	13.1602	0.0023	0.3572	-	-	-	-	0.99858
	40°	-	-	-	14.6810	0.0016	0.3893	-	-	-	-	0.98724
EYRING $\tau = n_0 \cdot \sinh^{-1}(\gamma/B)$	20°	-	-	-	-	-	-	1.0375	6.8074	-	-	0.84343
	30°	-	-	-	-	-	-	1.2108	11.0619	-	-	0.89904
	40°	-	-	-	-	-	-	1.1708	10.2669	-	-	0.89533
BINGHAM $\sigma = k \cdot \gamma + \sigma_0$	20°	-	0.0321	-	-	-	-	-	-	1.0224	-	0.91221
	30°	-	0.0262	-	-	-	-	-	-	1.2086	-	0.79524
	40°	-	0.0302	-	-	-	-	-	-	0.9486	-	0.92877
CARREAU $n = n_\infty + (n_0 - n_\infty) \cdot [1 + (k_1 \cdot \gamma)^2]^{(n-1)/2}$	20°	-	-	-	-	-	-	1.3880	-	-	103.2838	0.41478
	30°	-	-	-	-	-	-	1.4399	-	-	100.8762	0.50619
	40°	-	-	-	-	-	-	1.4510	-	-	84.1430	0.50758