



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**“LA EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN  
REOLÓGICA DE LA PECTINA DE GUAYABA”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIADA EN QUÍMICA INDUSTRIAL**

**P R E S E N T A :**

**MARIBEL GALLEGOS ESPINOSA**

**ASESOR: M en C. GRACIELA MARTÍNEZ CRUZ**

**COASESOR: DRA. ANAMARÍA VELÁZQUEZ SÁNCHEZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

### **A Dios**

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y vida para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### **A Maribel Gallegos**

*A su esfuerzo, dedicación y Perseverancia en haber terminado esta tesis.*

### **A mis Profesores**

*Por compartir sus conocimientos, siempre con dedicación y Paciencia. En especial a la Q.I. Griselda Ávila Enríquez por todo su apoyo.*

### **A mis Asesoras**

*La M. en C. Graciela Martínez Cruz y la Dra. Ana María Velázquez Sánchez, por brindarme su confianza y sus acertados consejos para la realización de esta tesis.*

### **A la FES CUAUTITLÁN**

*“Lo importante en la vida no es el triunfo sino la lucha. Lo esencial no es haber vencido, sino haber luchado bien.” (Barón Pierre de Coubertin).*

## **DEDICATORIAS**

---

### **A mis padres**

*Amalia Espinosa Juárez y Tomás Gallegos Cano, como un testimonio de cariño, amor y eterno agradecimiento por mi existencia, valores morales y formación profesional. Porque sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y porque nunca podré pagar todos sus desvelos, ni aún con las riquezas más grandes del mundo.*

### **A mis Hermanos**

*Delia y Heriberto, porque a pesar de que cada uno tiene su forma de ser hemos compartido muchos momentos felices y siempre han estado ahí brindándome su apoyo.*

### **A mis Amigos**

*Roberto Ortega, Beatriz Acosta, Alejandra Terrón, Carolina Medina, Angélica Lira, José Tamías, Karina Santiago, Griselda Ávila, Alan Guerrero, Rolando Vázquez, Ramiro, José Ángel Mascorro, quienes han formado parte de mi vida profesional gracias por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y tantos momentos gratos que pase en su compañía. Y por su puesto a los nuevos amigos: Rosa Laura Fuentes, Dulce García, Dulce Ocampo, Libia Nubia Bautista, Arehadne Vargas, Pedro Álvarez, Luis Arellanes, Andiria Vázquez, Gerardo Jiménez. Algunos están aquí conmigo otros en mis recuerdos y en mi corazón.*

***“Todo mundo Quiere tener un amigo,  
pocos se toman la molestia de ser uno”.***

# Índice

---

Contenido.....	iii
índice de Figuras .....	v
índice de Gráficas .....	vi
índice de Tablas .....	vii
Introducción .....	1
Objetivos .....	3
<b>Capítulo 1. Generalidades .....</b>	<b>4</b>
1.1 La Guayaba .....	4
1.1.1 El Origen .....	5
1.1.2 Taxonomía .....	6
1.1.3 Descripción Botánica .....	7
1.1.4 Producción .....	9
1.2 Pectina y Sustancias Pècticas .....	11
1.2.1 Pectina .....	11
1.2.2 Nomenclatura de las Sustancias Pècticas .....	13
1.3 Estructura General de las Pectinas.....	16
1.4 Clasificación de las Pectinas.....	17
1.4.1 Pectinas de Alto Metoxilo (HM) .....	17
1.4.2 Pectinas de Bajo Metoxilo (LM) .....	19
1.5 Propiedades Físicoquímicas de las Pectinas .....	21
1.6 Aplicaciones de las Pectinas .....	22
<b>Capítulo 2. Fundamentos Reológicos .....</b>	<b>25</b>
2.1 Reología .....	25
2.2 Número de Débora .....	25
2.3 Sólido de Hooke .....	26
2.4 Clasificación de los Fluidos .....	27
2.5 Fluidos Newtonianos.....	28
2.6 Viscosidad .....	32
2.6.1 Definición .....	32
2.6.2 Unidades.....	32
2.6.3 Determinación de la Viscosidad .....	33
2.6.4 Viscosidad Aparente .....	34
2.6.5 Viscosidad Cinemàtica .....	34
2.7 Esfuerzo de Corte o cizalla .....	34
2.8 Velocidad de Corte o Cizalladura.....	35
2.9 Fluidos no Newtonianos .....	35
2.9.1 Fluidos no-Newtonianos Independientes del Tiempo .....	35
2.9.1.1 Fluidos Pseudoplàsticos(Shear-Thinning) .....	36

2.9.1.2 Fluidos Reoespesantes (Shear- Thickening) .....	37
2.9.1.3 Plásticos de Bingham .....	38
2.9.2 Fluidos no-Newtonianos Dependientes del Tiempo .....	39
2.9.2.1 Fluidos Tixotrópicos .....	40
2.9.2.2 Fluidos Anti tixotrópicos o Reopécticos .....	41
2.10 Sustancias Viscoelásticas .....	42
2.10.1 Modelo de Maxwell.....	43
2.10.2 Modelo de Kelvin-Voigt .....	44
2.11 Modelos Funcionales para las Propiedades Reológicas .....	45
2.12 Aparatos de Medición.....	47
2.12.1 Viscosímetros Tipo Tubo .....	47
2.12.1.a Viscosímetro Capilar .....	48
2.12.1.b Viscosímetro Capilar de Alta Presión .....	49
2.12.2 Viscosímetro Rotacional .....	49
2.12.2.1 Viscosímetros de Cilindros Concéntricos .....	50
2.12.2.2 Viscosímetros de Cono y Plato .....	51
2.12.2.3 Viscosímetros de Platos Paralelos.....	53
<b>Capítulo 3. Desarrollo Experimental.....</b>	<b>55</b>
3.1 Matria Prima .....	55
3.2 Material.....	55
3.3 Equipo .....	56
3.4 Reactivos.....	56
3.5 Métodos de Extracción.....	56
3.5.1 Extracción de la pectina de Guayaba utilizando Ácido Clorhídrico 0.01 M .....	57
3.5.2 Extracción de la pectina de Guayaba utilizando Ácido Oxálico al 0.5 %. .....	60
3.5.3 Purificación de la Pectina .....	62
3.6 Caracterización Reológica de la Pectina .....	62
<b>Capítulo 4 Resultados y Discusión .....</b>	<b>64</b>
4.1 Resultados y Discusión de la Extracción .....	64
4.2 Resultados y Discusión de la Caracterización Reológica.....	66
4.2.1 Análisis de los Reogramas mediante el modelo de la ley de la Potencia.....	66
4.2.2 Curvas de Viscosidad de Pectina sin purificar extraída con HCl 0.01M .....	70
4.2.3 Curvas de Viscosidad de Pectina purificada extraída con HCl 0.01 M.....	72
4.2.4 Curvas de Viscosidad de Pectina sin purificar extraída con ácido oxálico 0.5% .....	75
4.2.5 Curvas de Viscosidad de Pectina purificada extraída con ácido oxálico 0.5% .....	77
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>79</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>81</b>
Anexo 1 Cuadro de la Estadística Descriptiva de los datos de la extracción .....	85
Anexo 2 Gráficas de Pectina sin Purificar extraída con HCl 0.01 M a Diferentes Concentraciones .....	87
Anexo 3 Gráficas de Pectina Purificada extraida con HCl 0.01 M a Diferentes Concentraciones .....	92
Anexo 4 Gráficas de Pectina sin Purificar extraida con Ac. Oxálico al 0.5 % a Diferentes Concentraciones..	95
Anexo 5 Gráficas de Pectina Purificada extraida con Ac. Oxálico al 0.5 % a Diferentes Concentraciones...	100

## Índice de Figuras

---

Figura 1.1 — Árbol de Guayaba.....	7
Figura 1.2 — El Fruto de la Guayaba .....	8
Figura 1.3 — Principales países Productores de Guayaba a Nivel Mundial .....	9
Figura 1.4 — Estados Productores de Guayaba en México .....	10
Figura 1.5 — Estructura de la Pared Celular Vegetal .....	11
Figura 1.6 — Molécula del Ácido D-Galacturónico .....	14
Figura 1.7 — Representación del Ácido Pécico.....	14
Figura 1.8 — Representación esquemática del ácido pectínico .....	15
Figura 1.9 — Fragmento de una molécula de pectina .....	15
Figura 1.10 — Estructura General de la Pectina .....	16
Figura 1.11 — Pectina de Alto Grado de Metoxilación .....	17
Figura 1.12 — Pectina de Bajo Grado de Metoxilación .....	19
Figura 1.13 — Modelo de la Caja de Huevo .....	20
Figura 2.0 — Modelo del Sólido de Hooke .....	27
Figura 2.1 — Clasificación de los Fluidos .....	28
Figura 2.2 — Modelo de un Fluido Newtoniano .....	29
Figura 2.3 — Representación Física de un Fluido Newtoniano.....	30
Figura 2.4 — Comportamiento Típico de un Fluido Newtoniano .....	31
Figura 2.5 — Visualización de Cuatro tipos de Cizalladura .....	33
Figura 2.6 — Representación Gráfica de un Fluido Pseudoplástico .....	36
Figura 2.7 — Representación Gráfica de un Fluido Reoespesante .....	37
Figura 2.8 — Representación Gráfica del Plástico de Bingham.....	38
Figura 2.9 — Representación Gráfica de un Fluido Tixotrópico .....	40
Figura 2.10 — Representación Gráfica de un Fluido Reopécico .....	41
Figura 2.11 — Modelo de Maxwell .....	43
Figura 2.12 — Modelo de Kelvin-Voigt .....	44
Figura 2.13 — Clásificación de los Instrumentos Reológicos .....	47
Figura 2.14 — Viscosímetros Capilares .....	48
Figura 2.15 — Viscosímetro Capilar de Alta Presión .....	49
Figura 2.16 — Viscosímetro de Cilindros Concéntricos .....	50
Figura 2.17 — Viscosímetro de Geometría de Cono y Plato .....	52
Figura 2.18 — Viscosímetro de Geometría de Platos Paralelos.....	53
Figura 3.0 — Lavado de las Guayabas y Obtención de la Pulpa .....	57
Figura 3.1 — Relación pulpa: solución 3:1. pH = 3 .....	57
Figura 3.2 — Mezcla calentada por 1h, con agitación .....	58
Figura 3.3 — Filtrado de la Pulpa .....	58
Figura 3.4 — Precipitación del gel de pectina con alcohol y Posterior recuperación .....	59
Figura 3.5 — Pectina extraída con Ácido Clorhídrico 0.01M.....	59
Figura 3.6 — Láminas de Pectina pulverizadas en el molino de café. ....	60
Figura 3.7 — Mezcla relación pulpa: solución 2:1 en reposo durante 48 hrs.o Oxálico al 0.5 % .....	61
Figura 3.8 — Pectina Extraída con Ácido Oxálico al 0.5 % .....	61
Figura 3.9 — Reómetro.....	62

## Índice de Gráficas

---

Gráfica 4.1 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 0.5% extraída con HCl 0.01M .....	70
Gráfica 4.3 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 1.5% extraída con HCl 0.01 M .....	71
Gráfica 4.6 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 3.0% extraída con HCl 0.01M .....	72
Gráfica 4.9 — Reograma de Pectina Purificada al 0.5% extraída con HCl 0.01 M .....	73
Gráfica 4.10 — Reograma de Pectina Purificada al 1.5% extraída con HCl 0.01M .....	74
Gráfica 4.11 — Reograma de Pectina Purificada al 3.0% extraída con HCl 0.01 M .....	74
Gráfica 4.12 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 0.5% extraída con ácido oxálico al 0.5% .....	75
Gráfica 4.14 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 1.5% extraída con ácido oxálico al 0.5% .....	76
Gráfica 4.17 — Reograma de Pectina Sin Purificar al 3.0% extraída con ácido oxálico al 0.5%.....	76
Gráfica 4.20 — Reograma de Pectina Purificada al 0.5% extraída con ácido oxálico al 0.5 %.....	77
Gráfica 4.21 — Reograma de Pectina Purificada al 1.5% extraída con ácido oxálico al 0.5% .....	78
Gráfica 4.22 — Reograma de Pectina Purificada al 3.0 % extraída con ácido oxálico al 0.5% .....	78



## *Índice de Tablas*

---

Tabla 1 — Contenido de Pectina en algunos Frutos y Vegetales .....	<b>12</b>
Tabla 2 — Valores de pKa para las pectinas y su grado de Esterificación .....	<b>21</b>
Tabla 3 — Modelos Funcionales que describen el Comportamiento de los Fluidos .....	<b>45</b>
Tabla 4 — Resultados del Rendimiento de Pectina.....	<b>64</b>
Tabla 5 — Parámetros Físicos para las Diferentes Soluciones de Pectina Sin Purificada extraída con ácido clorhídrico 0.01M .....	<b>68</b>
Tabla 6 — Parámetros Físicos para las Diferentes Soluciones de Pectina Purificada extraída con ácido clorhídrico 0.01M.....	<b>68</b>
Tabla 7 — Parámetros Físicos para las Diferentes Soluciones de Pectina sin Purificarextraída con ácido oxálico al 0.5% .....	<b>69</b>
Tabla 8 — Parámetros Físicos para las Diferentes Soluciones de Pectina Purificada extraída con ácido oxálico al 0.5 % .....	<b>69</b>
Tabla A.1 — Análisis Estadístico Descriptivo de los Resultados de las Extracciones .....	<b>86</b>

## ***INTRODUCCIÓN***

---

Se ha reconocido que México ocupa una posición privilegiada por su gran potencial económico gracias a la abundancia de recursos naturales, la riqueza de sus suelos sus escurrimientos de agua y superficies forestales. La guayaba por ejemplo es una variedad vegetal mexicana que se conoce desde tiempos precolombinos. Con ella, se hacen jaleas, compotas, ates, dulces, pasteles, agua refrescante, helados etc; además por su importancia alimentaria, industrial y agrícola, justifica su estudio en todos los niveles.

Por otra parte, la pectina es un coloide que tiene la capacidad de convertirse en gel en medio ácido y en presencia de azúcar, pertenece al grupo de los polisacaridos y se encuentra en la mayoría de los vegetales especialmente en los frutos cítricos. La pectina como agente estabilizante y gelante presenta diversidad de aplicaciones en la industria farmacéutica y de alimentos. En la primera es la base de muchos medicamentos antidiarreicos y en la segunda se utiliza para mejorar la calidad de productos procesados que requieren cierta viscosidad.

A pesar de que en el ámbito nacional existen publicaciones sobre el estudio de las pectinas extraídas de diferentes frutas o vegetales, la importancia de este trabajo radica en la de utilizar la pulpa de guayaba como otra alternativa viable para extraer pectina, empleando dos métodos por hidrólisis ácida relativamente sencillos, así como su caracterización reológica, con la finalidad de observar su comportamiento viscosimétrico a diferentes temperaturas. Tradicionalmente la pectina se ha obtenido de la cáscara de frutas cítricas, como el limón, la naranja, la toronja y la cascara de manzana, produciéndose pectina de muy buena calidad, sin embargo, en este trabajo, se propone emplear la pulpa fresca del fruto para extraer pectina, ya que México es uno de los principales productores de guayaba a nivel mundial, se produce un promedio de 300 mil toneladas anuales.

En esta investigación se realizó la extracción de la pectina de la pulpa de guayaba de la variedad mediana china, ya que es la de mayor consumo en el mercado nacional, y posteriormente se caracterizó reológicamente para determinar su comportamiento viscosimétrico, con esto, se pretende dar la pauta para que, más adelante se continúe con el estudio de la pectina extraída de la pulpa de guayaba y de este modo contribuir en la generación y el desarrollo de la tecnología química a escala laboratorio y planta piloto.

En el primer capítulo del trabajo se presenta una reseña sobre la guayaba en cuanto a sus propiedades, su origen, producción, clasificación taxonómica, utilidad, así como un panorama general sobre la pectina, estructura, clasificación, propiedades y aplicaciones industriales.

El capítulo dos muestra los fundamentos reológicos más sobresalientes que se deben de conocer para poder cimentar los resultados obtenidos en la caracterización como la clasificación de los fluidos, la viscosidad, velocidad de cizalla, esfuerzo de cizalla, tipos de viscosímetros. En el capítulo tres se presenta el desarrollo experimental que consistió en la extracción de la pectina, posterior purificación y caracterización. En el capítulo cuatro, se presentan los resultados de la extracción y caracterización reológica, así como una breve discusión sobre los mismos. En el capítulo cinco se presentan las conclusiones del trabajo.

Finalmente a manera de anexos se presentan los gráficos a las diferentes concentraciones, los datos y la estadística de las mediciones.

# **OBJETIVOS**

---

## **OBJETIVO GENERAL**

- Caracterizar reológicamente la pectina de guayaba, extraída por dos métodos diferentes, empleando un reómetro con la geometría de cono y plato.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Extraer la pectina de la guayaba: por el método de disolución de ácido clorhídrico 0.01M y de la disolución de Ácido Oxálico al 0.5 %.
- Estudiar las diferencias de comportamiento reológico entre las dos pectinas, extraídas por los dos procedimientos.
- Analizar la influencia de la concentración de pectina y temperatura en las propiedades reológicas de las dispersiones de esta sustancia.

## CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES

---

### 1.1 LA GUAYABA [35, 36]

El guayabo es una planta con mucha capacidad de adaptación en diferentes condiciones climáticas, edafológicas, hidrológicas; tales como temperatura, precipitación, humedad, suelo, altitud y latitud. Esta fruta tropical pertenece a la familia de las Mirtáceas que incluye más de 3,000 especies de árboles y arbustos de los cinco continentes. Todas las guayabas son producidas por árboles del género *Psidium* que crecen en regiones tropicales de América, Asia y Oceanía. La guayaba fue consumida primero como fruta fresca de mesa y en la preparación de aguas de fruta; después se utilizó en conservas y dulces; posteriormente se le sometió a procesos industriales para la obtención de pulpa, enlatados de fruta en almíbar, mermeladas, ates, jugos y néctares. El índice de digestibilidad de este producto en fresco es de un 90 %, aproximadamente. Está disponible en los mercados todo el año con dos periodos de mayor producción: el primero inicia en febrero y culmina en mayo, el segundo es de julio hasta agosto.

Esta fruta, por su valor nutritivo, es de suma importancia para la dieta alimenticia; su componente mayoritario es el agua. Es de bajo valor calórico por su escaso aporte de hidratos de carbono y menor aún de proteínas y grasas. Contiene provitamina A o beta-caroteno que se transforma en vitamina A en nuestro organismo conforme éste lo necesita. Es la fruta más rica en Vitamina C (interviene en la formación de colágeno, huesos y dientes, glóbulos rojos y favorece la absorción del hierro de los alimentos y la resistencia a las infecciones), aún más que el limón, naranja o toronja, pues se calcula que en promedio 100 gramos de guayaba contiene más de 273 miligramos de esta vitamina, dosis más que suficiente para cubrir los 60 mg diarios que necesita una persona adulta.

También aporta en menor medida otras vitaminas como Tiamina (B1) indispensable en el aprovechamiento de carbohidratos y proteínas, y el buen funcionamiento del sistema nervioso; la Riboflavina (B2), compuesto esencial para que los tejidos utilicen en forma

adecuada el oxígeno; y la niacina (B3), necesaria para que los tejidos quemén de manera eficaz los carbohidratos y proteínas que producen energía.

Respecto a los minerales, destaca su aporte de potasio (aproximadamente 280 mg por 100 gramos), que ayuda a controlar la presión arterial. Otros minerales obtenidos de la guayaba son Calcio, Hierro, Zinc, Sodio, Fósforo y Magnesio.

Su aporte de fibra es elevado por lo que posee un suave efecto laxante y previene o reduce el riesgo de ciertas alteraciones y enfermedades. Las hojas, ramas o la corteza del árbol de guayaba preparada en infusiones, se pueden utilizar como astringentes intestinales y para dolores de estómago. El hacer gárgaras con esta infusión es un tratamiento muy eficaz para las encías inflamadas o ulceradas y otras heridas en la boca.

### **1.1.1 Origen<sup>[8]</sup>**

Es una especie nativa de América, siendo su centro de origen Brasil o en algún lugar entre México y Perú, de acuerdo con algunos investigadores. La guayaba fue domesticada hace 2000 años por los indígenas y fue propagada por los españoles y portugueses a todos los trópicos del mundo.

La hipótesis que se tiene para situar a América como el centro de origen del guayabo se sustenta, por un lado, por las más de 140 especies que comprende el género *Psidium*, distribuidas principalmente en el trópico americano y sólo una pequeña porción en el Oeste de la India<sup>[Koller (1996)]</sup>; y por otro lado, por los distintos nombres que se le han dado a las razas nativas”, actualmente se extiende desde México y Centroamérica, hasta Sudamérica, en específico Brasil y Perú, en las Antillas y el sur de Florida, además se le encuentra en más de 50 países de clima tropical.

El origen del nombre de la guayaba es polémico: para algunos estudiosos proviene de una voz caribe y se atribuye a escritos de navegantes que descubrieron la guayaba en los primeros viajes que Colón realizó por esa región de América. Para otros, el origen de la

palabra guayaba sería el náhuatl y provendría de cuáhuatl, árbol, y tlacoyahua, descortezado, resultando cuayahua, en alusión al constante desprendimiento de la capa externa de la corteza que caracteriza al árbol de guayabo.

Los principales nombres que se conocen en México son: Guayaba perulera (Rep. Mex.); Jalocote, Xalácotl, Chalcocotl (en Náhuatl), al-pil-ca (Chontal, Oax.), Pichi o Chac-pichi (Maya, Yuc.), A'sihui't (Totonaca, Pue.), Bjuí, Pehui, Yaga-hulí (zapoteco, Oax.), Ca'aru (Cora, Nay.), Enandi (tarasco, Mich.), Guayaba dulce (Tehuantepec, Oax.), Guayaba manzana (Tab.); Guayabo de venado (Col.), Xoxococuabiti ( Tetelcingo, Mor.), Sumbadán (Soque, Chis.), Vayevavaxi-te (Huichol, Jal.), Bec (Husateca, S.L.P), Guáibasim (dialecto mayo).

### 1.1.2 Taxonomía <sup>[8]</sup>

La clasificación taxonómica de la guayaba según el sueco Carlos Linneo, considerado padre de la botánica científica desde el siglo XVIII es la siguiente:

<b>Nombre Científico:</b>	<i>Psidiumguajava L.</i>
<b>Nombre Común:</b>	Guayaba
<b>Orden:</b>	Myrtales
<b>Familia:</b>	Myrtaceae
<b>Subfamilia:</b>	Mirtoideae
<b>Tribu:</b>	Myrteae
<b>Género:</b>	<i>Psidium</i>
<b>Especie:</b>	<i>guajava</i>

### 1.1.3 Descripción Botánica <sup>[8]</sup>

**Árbol.** El guayabo es una planta arbórea o arbustiva que alcanza una altura de 3 a 10 metros y su fruto se conoce como guayaba, el tronco del árbol es generalmente corto, retorcido, la corteza externa es escamosa de color pardo rojiza, la corteza interna es de color crema rosado, fibrosa, alcanzando un diámetro de hasta 60 cm., posee una copa amplia y extendida que se ramifica cerca del suelo y puede llegar a ser muy denso, como se puede apreciar en la Figura 1.1.

Figura 1.1 — Árbol de Guayaba



Fuente: Extraído de la página electrónica  
<http://miami-dade.ifas.ufl.edu/old/programs/tropicalfruit>

**Hojas.** Las hojas de este cultivo son simples, de forma oblonga. La lámina tiene 5 cm. de largo por 2.5 hasta 6 cm. de ancho, posee venas prominentes en el envés (parte inferior).

**Flores.** Las flores se desarrollan en las axilas de las hojas, en ocasiones son solitaria, pero generalmente en cimas; son blancas, miden aproximadamente un centímetro de diámetro.



**Frutos.** Los frutos pueden variar desde poseer una cáscara delgada que rodea una pulpa firme con numerosas semillas o poseer una cáscara gruesa y una pulpa blanca con pocas semillas. Son bayas de hasta 8 cm de diámetro. Pueden tener forma redondeada semejante a un limón o parecida a una pera, su cáscara es cerosa y usualmente amarilla; mientras la pulpa puede ser blanca, amarilla, rosada o roja, de olor fragante y sabor agridulce. Como se puede apreciar en la Figura 1.2.

Figura 1.2 — El Fruto de la Guayaba



Fuente: Extraído de la página electrónica  
<http://miami-dade.ifas.ufl.edu/old/programs/tropicalfruit>

En México existen tres variedades de guayaba las cuales son:

- **China**, el fruto es pequeño, de forma redonda y generalmente de mucha consistencia, la pulpa es de color crema y tiene abundante semilla. Este tipo se destina a la industria, pero su tendencia es a desaparecer por su poca aceptación.
- **Mediana China**, el fruto es de forma ovoide, de pulpa color crema y sabor agradable, su tamaño es regular de 5 a 6 cm de diámetro. Se ha establecido en el 90% de las huertas, dada su aceptación en el mercado.
- **Criolla**, en esta clasificación se ubican varios tipos de guayaba de tamaño y forma variables encontrándose con pulpa de color blanca, rosada y salmón.

### 1.1.4 Producción

El cultivo del guayabo se ha propagado en regiones de todo el mundo, debido a su alto poder de diseminación, adaptabilidad y a la formidable vitalidad de sus pequeñas semillas. La producción mundial de guayaba es de alrededor de 1.2 millones de toneladas anuales, en la Figura 1.3, se representan los principales productores de guayaba a nivel mundial como son la India y Pakistán que aportan el 50%, de la producción, México que produce el 25% y el resto lo aportan otros países como Colombia, Egipto, Estados Unidos, Perú, Venezuela, Puerto Rico, Cuba, República Dominicana, Bangladesh y Malasia. Las variedades que se comercializan en Europa se importan principalmente de Sudáfrica y Brasil [8].

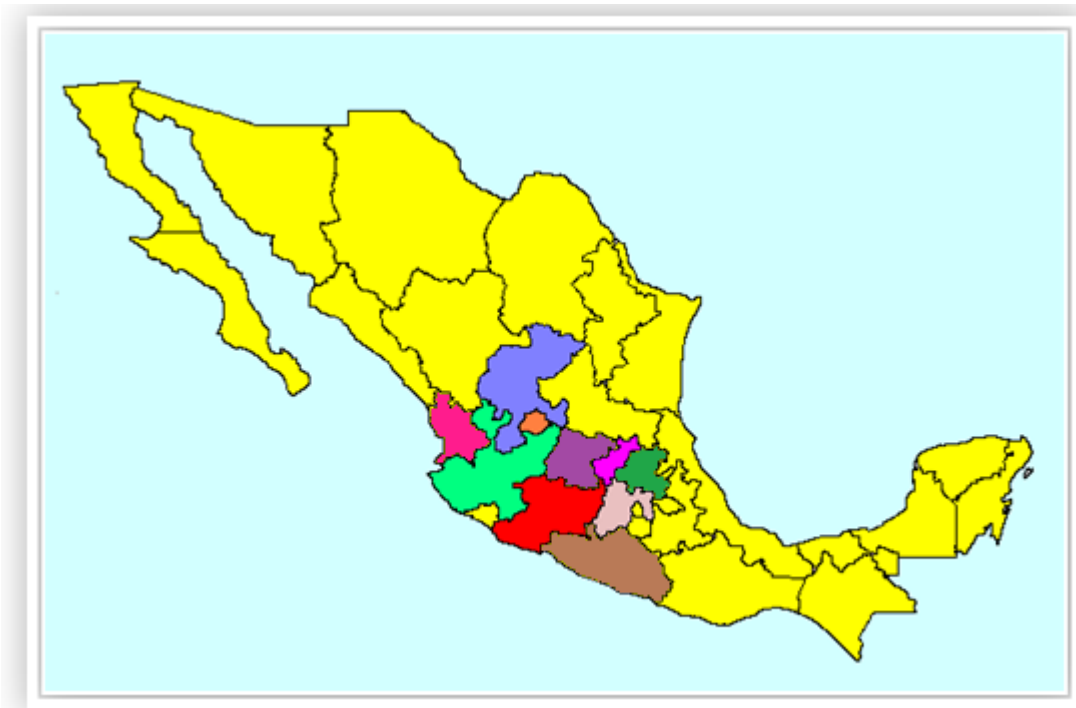
Figura 1.3 — Principales Países Productores de Guayaba a Nivel Mundial



Fuente: Elaborado con datos de la sección 1.1.3.1 Producción a Nivel Mundial

De acuerdo con cifras del Sistema Producto Guayaba, la producción anual de este fruto es de alrededor de 307 mil 279 toneladas en 22 mil 197 hectáreas, en la que participan diez entidades federativas: **Michoacán**, con 122 mil toneladas; **Aguascalientes**, con 102 mil 910; **Zacatecas**, con 61 mil 200; **Estado de México**, con 11 mil 111; **Guerrero**, con tres mil 729; **Jalisco**, con tres mil 546; **Guanajuato**, con mil 131; **Nayarit**, con 853; **Hidalgo**, con 449, y **Querétaro**, con 347 toneladas. En la Figura 1.4 se representan los principales estados productores de guayaba [35].

Figura 1.4 — Estados Productores de Guayaba en México



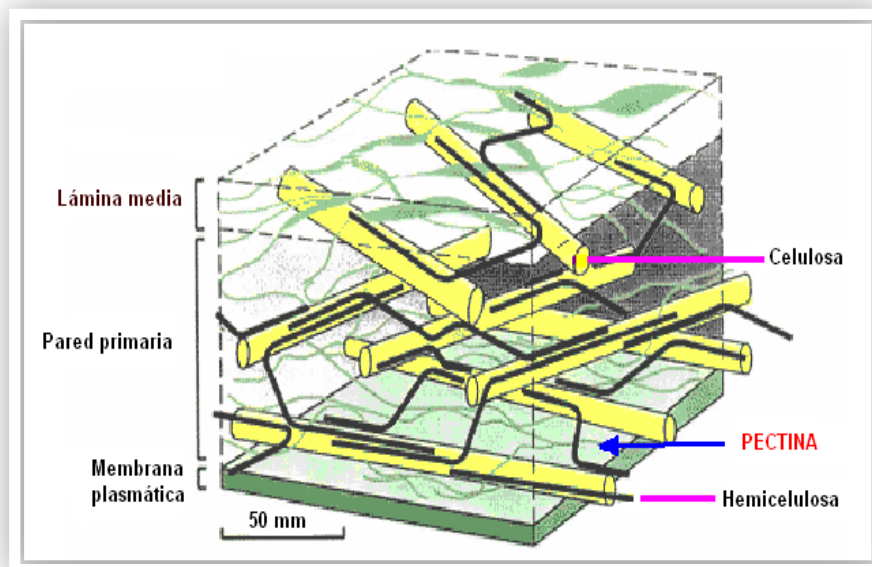
Fuente: Elaborado con datos de la sección 1.1.3.2 Producción a Nivel Mundial

## 1.2 PECTINA Y SUSTANCIAS PÉCTICAS

### 1.2.1 Pectina

La pectina fue descubierta por Vauquelin en 1790, y caracterizada por Braconnot en 1825 quien la describió como “**el principal agente gelificante en las frutas**” y le dio el nombre de pectina. En el siguiente siglo, Fermi, Wiesner, Manguin, Bourquelot, Hérissy, Tshirch y Rosemberg, entre otros, realizaron investigaciones sobre ella desde el punto de vista químico y biológico.<sup>[12]</sup> El término pectina proviene de la palabra griega *pektos* que significa “coagulado”. Es una macromolécula polisacárida, localizada en la pared primaria y la lámina media de las células vegetales de las plantas superiores. En la Figura 1.5 se puede observar la estructura de la pared celular, en la cual se puede apreciar cómo se encuentra distribuida la pectina.

Figura 1.5— Estructura de la Pared Celular Vegetal



Fuente: Extraída de la página electrónica [http://es.wikipedia.org/wiki/Pared\\_celular](http://es.wikipedia.org/wiki/Pared_celular)

Las pectinas contribuyen a la firmeza (adhesión intercelular) y la estructura del tejido vegetal determinan el grosor y el crecimiento de la pared celular. Se encuentra en cantidades considerablemente altas en tejidos vegetales blandos que crecen de manera

rápida y que tienen un gran contenido de agua. Los materiales más empleados para la extracción comercial de las pectinas cítricas son la lima, el limón y en menor grado, la naranja. Esos materiales cítricos generalmente provienen de la extracción del jugo y contienen una alta proporción de pectina de características como es el grado de esterificación. La pulpa de manzana, proveniente de la extracción del jugo de manzana, empleada para la extracción, produce una pectina más oscura que la pectina cítrica, de color pardusco, pero con propiedades funcionales esencialmente iguales. En la tabla 1, se muestra el contenido de pectina por cada 100 g de muestra, de algunos frutos y vegetales de consumo común [18].

Tabla 1 — Contenido de Pectina en algunos Frutos y Vegetales

FRUTOS	PECTINA (g/100g de muestra).	VEGETALES	PECTINA (g/100g de muestra).
Manzana	0.78	Haba	0.70
Plátano	0.94	Remolacha	0.91
Uva	0.19	Brócoli	0.49
Toronja	3.90	Col de Bruselas	0.78
Naranja	2.36	Col Roja	0.53
Durazno	0.39	Zanahoria	2.00
Pera	0.49	Lechuga	0.34
Piña	0.09	Cebolla	0.35
Ciruela	0.44	Chícharo	0.34
Fresa	0.75	Papa	0.83
Melón	0.18	Frijol de Soya	3.45
-----	-----	Espinaca	0.33
-----	-----	Tomate	0.20

Las pectinas se emplean como aditivos porque son valiosos agentes de espesamiento y de formación de geles. Cuando se calientan en agua acidulada vegetales o frutos ricos en pectinas, se libera la protopectina, transformándose en pectina hidrosoluble. Se produce la misma transformación de la protopectina(insoluble) en pectina soluble, en los tejidos vegetales durante el proceso de maduración, se debe en parte a una descomposición

molecular debido a la acción de las enzimas pectinolíticas<sup>1</sup> las cuales producen pectinas de cadena más corta con menores propiedades gelificantes y viscosantes. Aparte de la degradación enzimática, las pectinas son susceptibles a la degradación por calor y ácido<sup>2</sup>.

La pectina precipita fácilmente de las soluciones acuosas cuando se agrega alcohol o acetona, se forma un coágulo gelatinoso el cuál, es soluble en agua. Esta coagulación también se logra al emplear una mezcla de sales, tales como el  $Al_2SO_4$  junto con  $NH_4OH$ , formándose  $Al(OH)_3$ , cuyas partículas coloidales poseen carga de signo opuesto a la de la pectina. La pectina es un coloide cargado negativamente. La calidad y cantidad de pectina útil que presentan las frutas dependen de la especie y del tipo de fruta que se utilice, así como la técnica empleada en la extracción, por lo que sus propiedades gelificantes varían ampliamente debido a las diferentes longitudes de sus cadenas de ácido galacturónico y al distinto grado de esterificación y probablemente no haya dos preparaciones de pectinas idénticas en cuanto a sus estructuras.

### 1.2.2 Nomenclatura de las Sustancias Pécicas [1]

En el lenguaje utilizado para nombrar las sustancias pécticas, se distinguen varios términos de uso común, según la Sociedad Americana de Química, por lo que se definen a continuación.

\* **Sustancias Pécicas.** Son un grupo de polisacáridos vegetales en los cuales el ácido D-galacturónico como se muestra en la Figura 1.6, es el principal componente. Las cuales están consideradas que existen en combinación de cadenas. Estos se encuentran fundamentalmente asociados a la hemicelulosa, en la pared celular de células vegetales

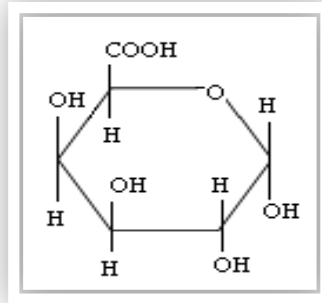
---

<sup>1</sup> Mezclas de pectinmetilesterasa (desesterificante), poligalacturonasas (despolimerizante). Degradan las pectinas a ácido galacturónico o poligalacturónico (Extraído de la Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos, Año XL. No. 342. Abril 2003).

<sup>2</sup> A temperatura baja, las pectinas se desesterifican en solución ácida. A temperatura alta, las moléculas se despolimerizan tanto en solución ácida como alcalina (Tomado de la Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos, Año XL. No. 342. Abril 2003).

siendo más abundantes en tejidos suaves como la cáscara de frutas cítricas, en la pulpa de manzana, tejocote, guayaba, etc.

Figura 1.6 — Ácido D-Galacturónico

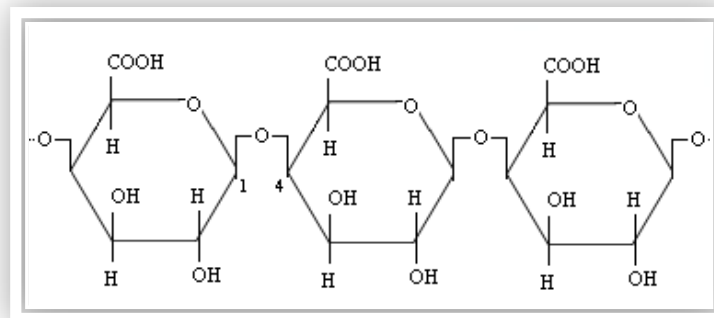


Fuente: Realizado por Maribel

\* **Protopectina.** Se aplica a las sustancias pécticas insolubles en agua, las cuales bajo hidrólisis fuerte generan pectinas o ácidos pectínicos.

\* **Ácido péctico o ácido poligalacturónico.** Son sustancias Pécticas en las cuales los grupos carboxilo de los ácidos galacturónicos unidos por enlaces  $\alpha$  1,4, como se aprecia en la Figura 1.7, están libres de grupos éster metílicos ( $\text{COOCH}_3$ ).

Figura 1.7 — Representación del Ácido Péctico

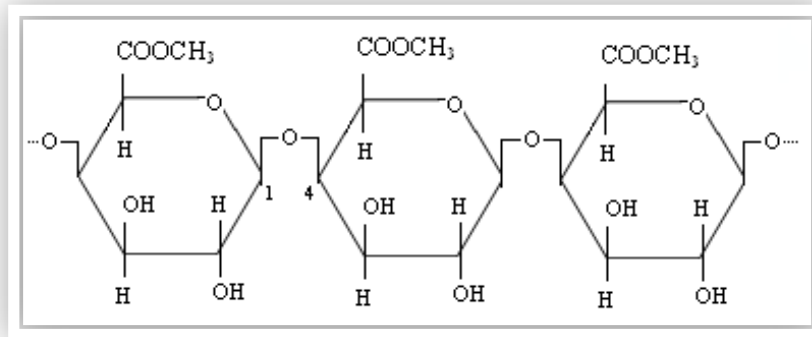


Fuente: Realizado por Maribel

\* **Ácidos Pectínicos.** Son polímeros de ácido galacturónico como se pueden apreciar en la Figura 1.8, con un grado de esterificación muy bajo no significativo. En condiciones

apropiadas de concentración, sólidos solubles y acidez pueden formar geles con azúcar como la sacarosa, cuyo grado de gelificación está en función del porcentaje de esterificación.

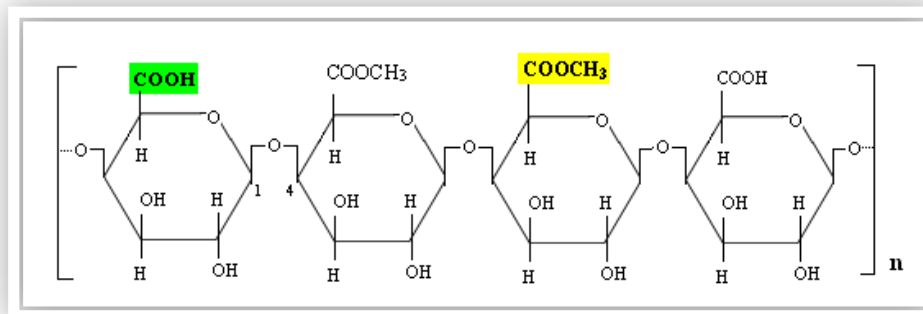
Figura 1.8 — Representación esquemática del ácido pectínico



Fuente: Realizado por Maribel

\* **Pectina.** El término general de pectina (o pectinas), designa a los ácidos pectínicos solubles en agua y que contienen los grupos carboxílicos del ácido poligalacturónico parcialmente esterificados con metanol Figura 1.9 y son capaces de formar geles con azúcar y ácido, bajo condiciones adecuadas.

Figura 1.9 — Fragmento de una molécula de pectina



Fuente: Realizado por Maribel<sup>3</sup>

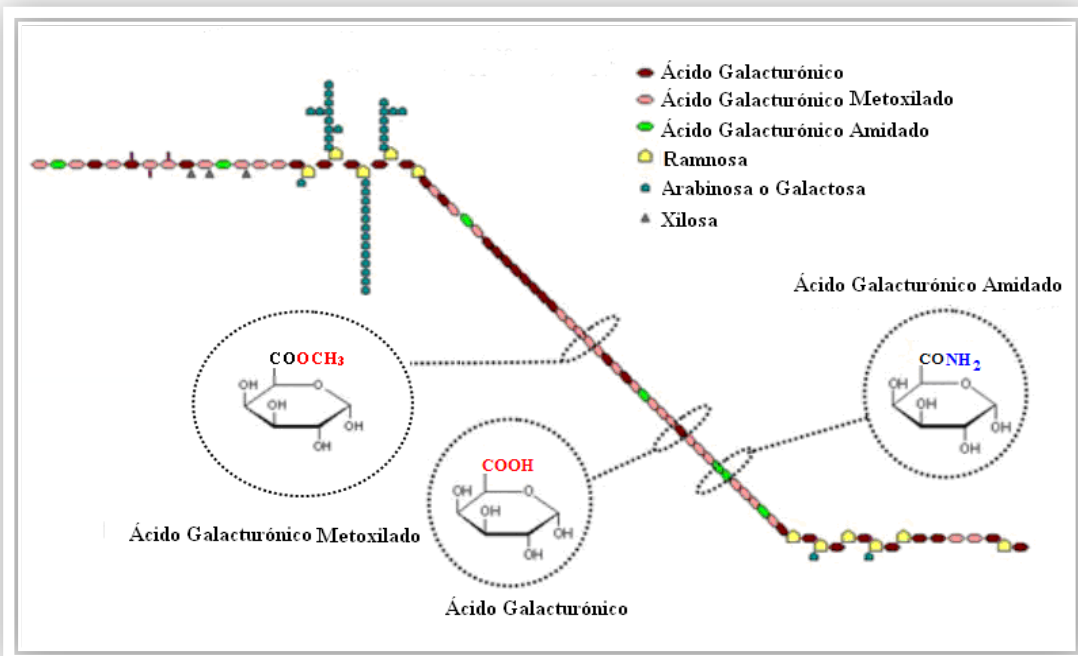
<sup>3</sup> Las Figuras que tengan la leyenda “Realizado por Maribel”, son dibujos reproducidos por Maribel extraídos de otras fuentes bibliográficas.



### 1.3 ESTRUCTURA GENERAL DE LAS PECTINAS

Las pectinas son heteropolisacáridos, cuya estructura básica está integrada por polímeros lineales de monómeros de ácido galactopiranosilurónico<sup>4</sup>, unidas por enlaces  $\alpha$ -D(1,4) –glicosídicos, y en la cual algunos grupos carboxilo pueden estar metoxilados, amidados o naturalmente esterificados con metanol. Figura 1.10, donde se puede apreciar que la cadena que constituye el esqueleto contiene regiones con muchas ramificaciones o cadenas laterales en las cuales se encuentran también azúcares neutros como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa unidas mediante enlaces  $\alpha$ -(1,2). Y en menor cantidad D-glucosa, D-manosa y D-xilosa.

Figura 1.10 — Estructura General de la Pectina



Fuente — Tomado de la Página electrónica [www.google.com.mx/imagenes/pectina](http://www.google.com.mx/imagenes/pectina)

<sup>4</sup> La “Food Chemical Codex (FCC); (El código químico de alimentos), define la pectina como un carbohidrato hidrofílico coloidal, el que consiste principalmente de unidades de ácido galacturónico parcialmente metilado [un galacturonglucano lineal de  $\alpha$ D (1,4), unido al ácido D-galactopiranosil].<sup>[1]</sup>

Aunque también se pueden apreciar numerosas unidades de ramnosa, con regiones no ramificadas, segmentos largos de galacturano, en que no hay unidades de ramnosa o éstas son escasas. Puede haber diferentes tipos de zonas ramificadas en diferentes pectinas de una misma pared celular e, incluso en una misma molécula de pectina.

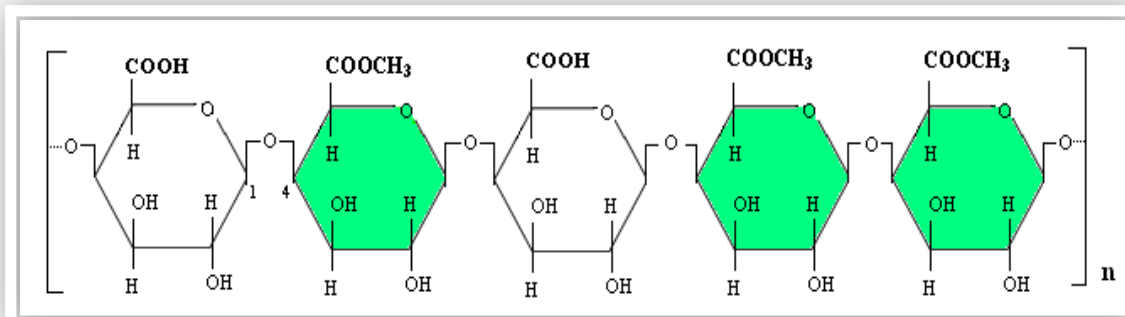
#### 1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS PECTINAS

Los grupos carboxílicos tienen influencia sobre la viscosidad de las soluciones pécticas dependiendo de su grado de esterificación (DE). El grado de esterificación se refiere al % de grupos carboxilos esterificados con metanol o etanol, distinguiéndose dos tipos:

##### 1.4.1 Pectinas de Alto Metoxilo (HM)<sup>5</sup>

Son aquellas en las cuales más del 50 % de los grupos carboxilo del ácido galacturónico del polímero se encuentra esterificado. Como se puede apreciar en la Figura 1.11. Estas pectinas gelifican a pH de 2.0 – 3.5 en un medio con un contenido en sólidos solubles (azúcar) entre 65% y 85%.

Figura 1.11 — Pectina de alto grado de metoxilación, su grado de esterificación (DE), es superior al 50 %



Fuente: Realizado por Maribel

<sup>5</sup> Por sus siglas en inglés HM (High Methoxyl).

Generalmente y teóricamente, una pectina puede contener un 16 % de metoxilo, pero en la práctica se ha encontrado que contiene alrededor del 14 %. Por esta razón se ha fijado el 7 % de metoxilo (50 % de esterificación con metanol) como la línea divisora para diferenciar las categorías de pectina en base a su contenido de metoxilo<sup>[2]</sup>.

### **- Formación del Gel**

Los geles de pectina de HM se forman cuando se encuentra presente la cantidad suficiente de pectina-ácido-azúcar en un medio con un pH ácido controlado entre 2.8 y 3.5 con una concentración de azúcar de un 65 % y hasta un 85 %. Si no se dan estas condiciones no se podrá formar un gel, sin importar cuánta pectina se agregue al medio. El gel de pectina de HM se estabiliza por medio de interacciones hidrofóbicas de los grupos estermetílico y mediante la formación de enlaces de hidrógeno intermoleculares. Puesto que el pH ácido de la solución provoca la protonación de los grupos carboxilato, estos en teoría neutralizan la carga lo suficiente para disminuir la repulsión electrostática entre las cadenas pécticas, y aumenta la formación de puentes de hidrógeno intermoleculares.

Sin embargo, el establecimiento de puentes de hidrógeno no basta para superar la energía de la pérdida de entropía (pérdida de la libertad de movimiento del polímero durante la formación de la zona de unión). La adición de un cosoluto como el **azúcar** (sacarosa), disminuye la actividad de agua ya que tiene un efecto deshidratante, el agua se encuentra entonces menos libre para solvatar la molécula del polisacárido, creando una estructura tridimensional que rodea las moléculas de azúcar altamente hidratadas, favoreciendo la interacción hidrofóbica entre los grupos éster metílico. Sin sacarosa, la contribución de la interacción hidrofóbica es demasiado pequeña para la formación de zonas de unión estables. Las pectinas de alto metoxilo se subdividen en dos grupos:

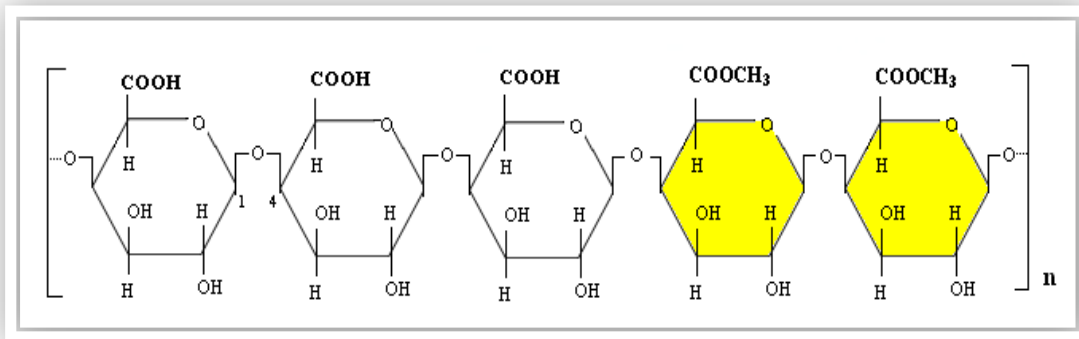
- Las de **Gelificación Rápida**. Gelifican antes de cinco minutos y con un grado de esterificación con metanol entre el 68 % y el 75 %.

- Las de **Gelificación lenta**. Gelifican después de cinco minutos con un grado de esterificación con metanol de 60-68 %.

#### 1.4.2 Pectinas de Bajo Metoxilo (LM)<sup>6</sup>

Son aquellas en las cuales menos del 50 % de los grupos carboxilo del ácido galacturónico del polímero se encuentra esterificado. Como se puede ver en la Figura 1.12. Su gelificación se controla introduciendo cationes divalentes al sistema, generalmente se emplea calcio.

Figura 1.12 — Pectina de bajo grado de metoxilación, su grado de esterificación (DE) es inferior al 50 %



Fuente: Realizado por Maribel

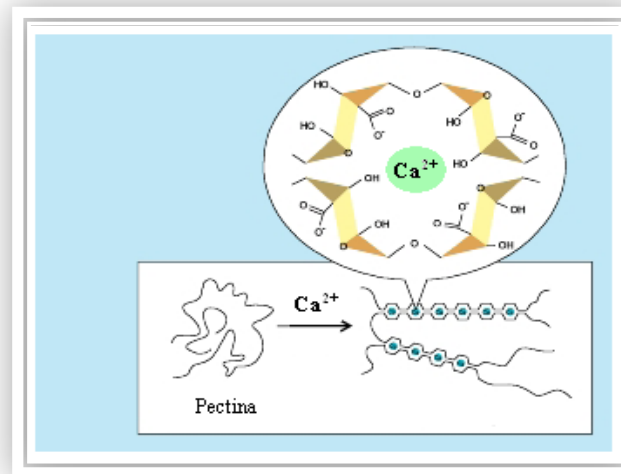
#### - Formación del Gel

La formación del gel ocurre cuando la cadena del polímero interactúa consigo misma, o con otras cadenas de pectina adyacentes, ya que en estas condiciones los carboxilos se encuentran ionizados y pueden establecer uniones iónicas con otras moléculas de pectina, la presencia de cationes divalentes (generalmente iones **calcio**, los cuales son particularmente efectivos para formar complejos con los carbohidratos) favorece la gelificación mediante interacciones electrostáticas, ya que dichos cationes, coordinados,

<sup>6</sup> Por sus siglas en inglés LM (LowMethoxyl).

hacen de puente entre dos grupos carboxilo pertenecientes a cadenas polimérica muy cercanas, esto se conoce como modelo de la “caja de huevos” o “egg box”, como se puede apreciar en la Figura 1.13.

Figura 1.13 — Modelo de la Caja de Huevo



Fuente: Extraído de la página electrónica <http://www.kimica.jp/>

Cantidades de iones calcio demasiado altas a pH 3 a 5 pueden destruir el gel por un incremento del entrecruzamiento hasta tal punto que la pectina precipita. La duración de las zonas de unión depende de la fuerza de las interacciones electrostáticas, que, a su vez depende de la longitud de las zonas de unión ininterrumpidas (unidades de ramnosa interrumpe y, por tanto termina la zona de unión). De manera que se logra estabilidad cuando hay al menos siete grupos carboxilos consecutivos en cada cadena participante en el enlace. El peso molecular de la pectina, que depende directamente de la longitud de la cadena molecular, influirá en la solidez del gel producido, es decir el poder gelificante de la pectina. El mecanismo de gelificación de las pectinas HM y LM exige la aproximación de las cadenas de polisacárido para formar zonas de unión, similares a las que se dan en los geles de alginatos.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Los alginatos son las sales del ácido algínico, polisacárido lineal constituido por dos unidades monoméricas, el ácido  $\beta$ -D-manurónico (M) y el ácido  $\alpha$ -L-gulurónico (G). Estos se agrupan en bloques de secuencias MM, MG, unidos por enlaces glucosídico  $\beta$  (1-4); y bloques GG, GM, unidos por enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4). Las regiones de bloques M corresponden a

## 1.5 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS PECTINAS<sup>[2]</sup>

Como polímero del ácido galacturónico, las sustancias pécticas presentan propiedades fisicoquímicas únicas, que cambian cuando la pectina es completamente esterificada por medios químicos o enzimáticos algunas de estas propiedades se citan a continuación:

\* **Solubilidad.** La pectina es soluble en el agua, aunque también es soluble en formamida, dimetilformamida y glicerina caliente. Es además insoluble en solventes orgánicos y en soluciones de detergentes cuaternarios, polímeros, proteínas y cationes polivalentes.; estos agentes se emplean para precipitar la pectina de las soluciones después de un proceso de hidrólisis por tratamiento de la materia prima.

\* **Acidez.** Las sustancias pécticas son neutras en su estado natural, en solución tienen carácter ácido el cual depende del medio y del grado de esterificación. En la Tabla 2 se mencionan algunos valores de pKa para las soluciones de pectina que se han reportado [18].

Tabla 2 — Valores de pka para las pectinas y su grado de Esterificación (DE).

pKa	DE %
3.55	65.0
4.10	0.0

\* **Rotación Óptica.** Las soluciones de pectina son ópticamente activas, se ha encontrado que la pureza aumenta el valor de la rotación; así el pectato de naranja con el 92 % de pureza tiene +277° de rotación específica mientras con el 95.5 % de pureza tiene una rotación óptica de +300°. Sin embargo, se ha reportado que en general la rotación específica de las pectinas es de +230° [1].

---

cadena lineales, mientras que los bloques G presentan una estructura en forma de bucle. Cuando dos cadenas de bloques G se alinean lado a lado resulta un hueco en forma de diamante, el cual tiene la dimensión ideal para acomodar en su interior un ión calcio, formándose una estructura dimérica. Éste modelo fue propuesto por Grant en 1973 ("egg-box model") para explicar las propiedades gelificantes de los alginatos al reaccionar con sales cálcicas.

\* **Viscosidad.** Las pectinas forman soluciones viscosas en agua, esta propiedad depende del grado de polimerización de la pectina, el pH, la temperatura, la concentración y la presencia de electrolitos. En las pectinas con alto grado de esterificación la viscosidad aumenta al aumentar el peso molecular, los grupos laterales y la concentración de la pectina en solución. El calcio y otros iones polivalentes aumentan la viscosidad de las soluciones de pectina y algunas pectinas de bajo metoxilo pueden gelificar si la concentración de calcio supera un cierto límite. En un medio sin calcio la viscosidad disminuye cuando el pH se aumenta por encima del pKa. La viscosidad de las soluciones de pectina puede emplearse como un medio para determinar el peso molecular de la pectina o para evaluar el efecto viscosante de la misma. En primer caso la viscosidad debe medirse en un medio acuoso libre de calcio a un pH estable.

\* **Longitud de las Cadenas.** Esta determina la consistencia del gel y está relacionada con el poder gelificante. El poder de gelificación se expresa en grados SAG. *Un grado SAG se define como la cantidad de sacarosa en gramos que un gramo de pectina es capaz de gelificar en condiciones específicas.* Decir que una pectina es de 150° SAG significa que un gramo de pectina es capaz de gelificar 150 gramos de azúcar para formar un gel de firmeza adecuada a un pH aproximadamente 3.0 y con un 65 % de sólidos solubles.

## **1.6 APLICACIÓN DE LAS PECTINAS**

Las pectinas son un componente natural de muchos alimentos de origen vegetal, por lo que su uso como aditivo alimentario está permitido en todos los países del mundo, sin limitación en la dosis recomendada, excepto la determinada por las buenas prácticas de fabricación.

### \* **En la Industria de Alimentos**

La pectina es el agente gelificante mas importante usado en la industria alimenticia, ya sea en una etapa intermedia del proceso o en el producto final, porque le confiere a los alimentos las características reológicas y también la textura deseada por el fabricante y

el consumidor. Se usa como agente gelificante, espesante y emulgente, en la elaboración de:

- Mermeladas y Jaleas
- Productos de Confeitería (gomas, rellenos )
- Concentrado de Frutas para Beber (Este uso de la gelificación es evidente en el producto final, únicamente como un efecto de espesamiento).
- Jugo de Frutas (para restaurar la consistencia del jugo, al del jugo fresco)
- Estabilizante de helados, Postres Fríos y en la Mayonesa
- En Soluciones para Recubrir salchichas y Carnes Enlatadas.
- En Productos Lácteos Fermentados y Directamente Acidificados (yogurt, queso)
- En Productos de Pastelería (especialmente en las capas de azúcar batida con claras de huevo).

**\* *En la Industria Farmacéutica***

La capacidad de la pectina de agregar viscosidad y estabilizar emulsiones y suspensiones, es empleada en la formulación y preparación de formas farmacéuticas como son:

- Las Suspensiones, los polvos o las tabletas de efectos anti-diarreicos, contienen a menudo una mezcla de caolín, pectina y de un antibiótico.
- Por su acción desintoxicante, anticolesterol, inmunológica, antihemorrágica y cicatrizante.
- Otros trabajos incluyen el estudio de los efectos como antioxidante sanguíneo, el empleo para el control de los niveles de glucosa en la sangre y como anticancerígeno en general.
- La pectina es eficaz contraveneno en las intoxicaciones con metales pesados (mediante la formación de sales).
- Se usa en la formación de complejos que retrasan la acción de la insulina, penicilina, epinefrina, estreptomina, etc.



**\* *En Otras Industrias***

- Se usan también para formar películas para recubrir papel y dar características de suavidad en el papel de envoltura.
- Como vehículo en la preparación de suspensiones de sulfato de bario para aplicar en las radiografías por rayos X.
- En la fabricación de películas biodegradables en forma de mezclas de pectina y alcohol polivinílico como reemplazantes de derivados del petróleo; estas películas son biodegradables, reciclables y permitidas para formas farmacéuticas de liberación prolongada y como protectores o adhesivos en preparaciones farmacéuticas para la piel.
- En metalurgia se emplea mezclada con otras gomas para sustituir los aceites empleados para dar dureza al acero.
- En la industria de barnices, fibras y explosivos, se emplea como agente viscosante, abrillantador y adhesivo.
- Gran variedad de pastas para productos cosméticos se preparan con pectina, esta actúa como estabilizador.
- En la preparación de medios de cultivo bacteriológico se emplean varios tipos de pectinas como medio de identificación de ciertos microorganismos y como sustitutos del agar.

## ***CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS REOLÓGICOS***

---

La reología en las últimas décadas ha tenido un auge muy grande, debido a su utilidad en el estudio de plásticos, fibras sintéticas, pastas, lubricantes, cremas, suspensiones y emulsiones; los cuales son la materia prima de la industria farmacéutica, cosmética, agroalimentaria, cerámica, de pintura, de barnices y otras. La importancia que se le otorga a la calidad, exigen entender mejor la función de las propiedades de los materiales que los constituyen. Además de ofrecer un olor, un color y un sabor característicos, exhiben determinado comportamiento mecánico: reaccionan de un cierto modo cuando intentamos transformarlos. Para estimar su comportamiento mecánico, existen dos procedimientos; uno de ellos consiste en tocar, estrujar, morder o masticar el alimento y describir las sensaciones recogidas (método sensorial). El segundo grupo de procedimientos es el método físico, a este comportamiento se le conoce como *Reología*.

### ***2.1 REOLOGÍA<sup>8</sup>***

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia causadas por la aplicación de un esfuerzo externo, esto es como un material responde a una fuerza y la manera en que ese material se deforma o fluye como respuesta a ese tratamiento.

### ***2.2 NÚMERO DE DÉBORA ( $D_e$ )***

Si un material sometido a un esfuerzo se deforma y no fluye, ese material se denomina sólido y si el material sometido, aunque sea a una diferencial de esfuerzo fluye, se está en presencia de un fluido. Aunque también un material puede exhibir una conducta combinada de características tanto de líquido como de sólido, por lo que se dice que se trata de una sustancia viscoelástica.

---

<sup>8</sup> Esta definición fue dada originalmente por el profesor Eugene Cook Bingham del Colegio Lafayette de Indiana en 1929.

Reológicamente para determinar si un material se comporta como un sólido o como un fluido, en el tiempo de escala del proceso de deformación, se emplea el número de Débora ( $D_e$ ), el cual es un parámetro adimensional, definido por el Profesor Marcus Reiner (1945). La idea es *“Todo fluye si se espera el tiempo suficiente, hasta las montañas”*:

$$D_e = \frac{t}{T}$$

Donde  $T$  es el tiempo característico del proceso de deformación observado y  $t$  es una característica del tiempo del material.

Por lo tanto se puede clasificar el comportamiento del material dentro de tres categorías:

$D_e \gg 1$  Como un sólido

$D_e \sim 0$  Como viscoelástico

$D_e \ll 1$  Como un fluido

Los fluidos no importa cuán viscosos sean, serán el producto del esfuerzo más pequeño. Los sólidos no importa que tan plásticos sean requieren una cierta magnitud de esfuerzo antes de empezar a fluir.<sup>[19]</sup>

### **2.3 SÓLIDO DE HOOKE**

El sólido de Hooke es el sólido teórico, también llamado sólido 100 % elástico y recupera instantáneamente y por completo su forma original al suspender el esfuerzo, es decir; la deformación es proporcional a la fuerza que la produce. Su viscosidad es infinita, tiene estructura bien definida y es isotrópico (exhibe propiedades idénticas en todas direcciones). Su comportamiento reológico no se ve afectado por el tiempo. La ecuación constitutiva en este caso es:

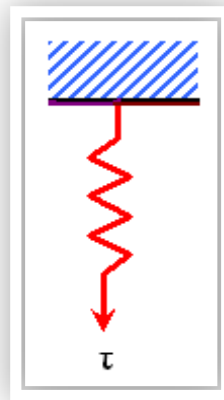
$$\tau = G \cdot \gamma$$

Esta fórmula nos dice que si se aplica un esfuerzo cortante  $\tau$  sobre un cuerpo sólido, este va a sufrir una deformación  $\gamma$  Donde  $G$  es una constante de proporcionalidad característica de cada cuerpo elástico denominando Módulo de Young.

El Módulo de Young es una medida de la rigidez o resistencia a la deformación de un material, es decir una respuesta lineal entre esfuerzo y deformación. Se representa por una línea recta que pasa por el origen hasta el límite de elasticidad (esfuerzo máximo que un cuerpo puede resistir sin perder sus propiedades elásticas).

El modelo de Hooke se representa comúnmente como un resorte en espiral de metal, estirado por una fuerza, como se puede apreciar en la Figura 2.0.

Figura 2.0 — Modelo del Sólido de Hooke



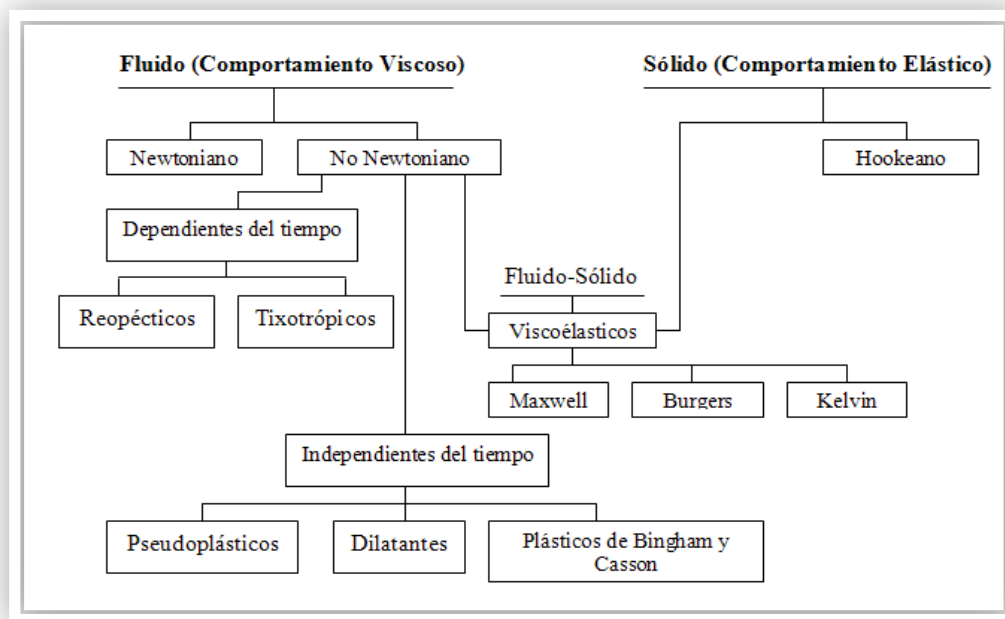
Fuente — Realizado por Maribel Gallegos

## ***2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS***

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un sistema de fuerzas externas, con lo que fluye, por tanto, en ausencia de estas, no habrá deformación. Dicho sistema de fuerzas se representa matemáticamente mediante

el esfuerzo cortante  $\tau$  mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ . Los fluidos pueden ser líquidos o gases, a veces resulta difícil distinguir entre sólidos y fluidos, porque los sólidos pueden fluir muy lentamente cuando están sometidos a presión, como ocurre por ejemplo en los glaciares. En el caso de un fluido viscoelástico sometido a una tensión tangencial (esfuerzo de corte), también se produce la deformación, expresada como gradiente de velocidad o velocidad de deformación, según la ley de Newton. Dependiendo de cómo evolucione la viscosidad de un fluido al aplicarle una fuerza se puede realizar una clasificación como la que se muestra en la Figura 2.1<sup>[23]</sup>

Figura 2.1 — Clasificación de los Fluidos



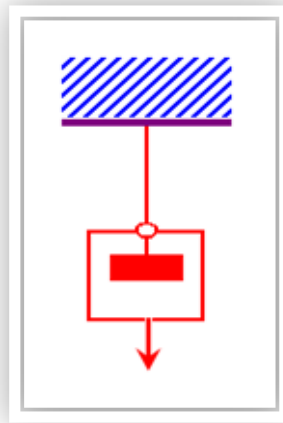
Fuente: Traducido por Maribel de *Rheological Methods in Food Process Engineering*; Capítulo 1. p. 50.

## 2.5 FLUIDOS NEWTONIANOS

También llamado fluido verdadero, es aquel que, sometido a un esfuerzo de corte, fluye y se deforma con una velocidad que es directamente proporcional al esfuerzo aplicado,

representándose por un línea recta, a la constante de proporcionalidad se la define como coeficiente de viscosidad  $\eta$ , viscosidad dinámica o simplemente viscosidad del material; por lo que, el flujo viscoso de un líquido newtoniano implica una deformación no recuperable. El líquido newtoniano ideal carece de propiedades elásticas, es incomprensible, isotrópico, presentan este comportamiento, la mayoría de los líquidos simples como el agua, todos los gases, disolventes de baja masa molecular, algunas suspensiones o disoluciones macromoleculares; si la cadena consta de menos de 1.000 átomos ( como algunas proteínas), bebidas carbonatadas, bebidas alcohólicas (si no contienen moléculas de cadena larga), los extractos de carne, el jarabe de maíz, algunos aceites ligeros de cocina, ciertas mieles, la leche, gasolina, mercurio, glicerol, glicerina, las disoluciones diluidas de goma arábica y pastas con bajo contenido en sólidos. En general la mayoría de fluidos constituidos por moléculas sencillas son newtonianos. El Modelo de este comportamiento es representado por un amortiguador, como se muestra en el esquema de la Figura 2.2.

Figura 2.2 — Modelo de un Fluido Newtoniano

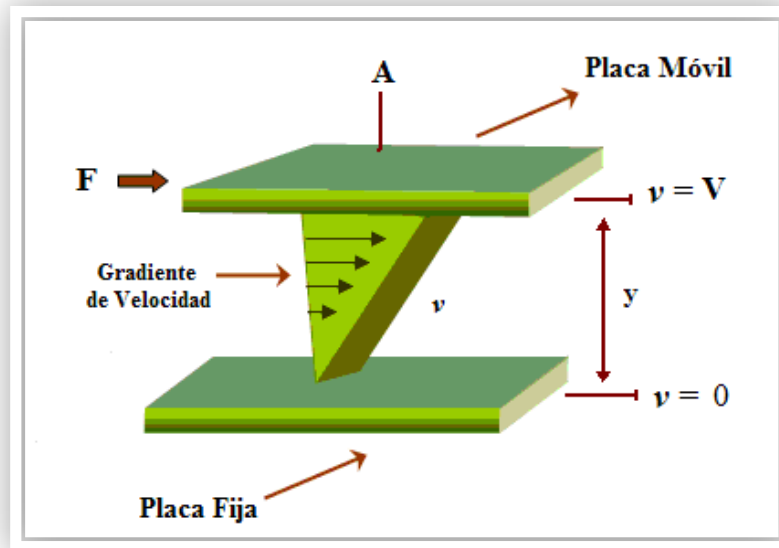


Fuente: Realizado por Maribel

Se puede examinar que al aplicar una fuerza en el pistón, la sustancia que se encuentra en el amortiguador es continuamente deformada; ya que existe una pequeña holgura entre ambos y el líquido puede pasar de un lado a otro del pistón, de hecho, el líquido sufre un cizallamiento al atravesar el pequeño espacio entre el pistón y el cilindro,

cuando la fuerza es suspendida, el pistón permanece en la posición que ha alcanzado, y la sustancia permanece deformada. La energía cinética que actúa en el cuerpo viscoso es proporcionada a los alrededores en forma de calor por la sustancia en deformación. El comportamiento reológico de un fluido newtoniano se ilustra en la Figura 2.3.

Figura 2.3 — Representación Física de un Fluido Newtoniano



Fuente: Realizado por Maribel

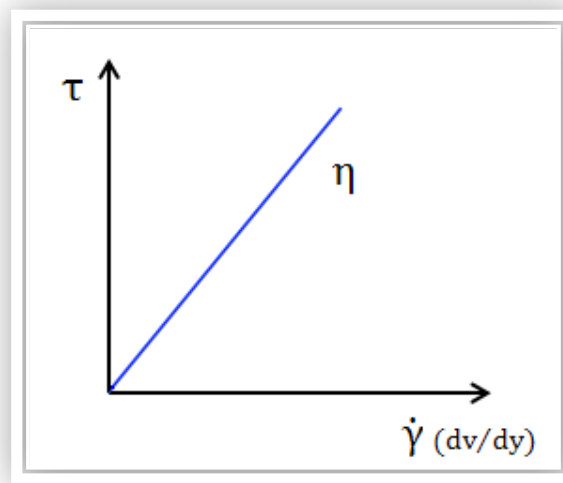
En este escenario, se confina un fluido entre dos placas paralelas de dimensiones infinitas, de un área superficial  $A$  cada una y separadas por una distancia constante  $y$ . La placa inferior se mantiene fija y a la superior se le aplica una fuerza constante  $F$ , para producir una velocidad  $V$ , de esta manera las capas de fluido en contacto con las placas se considera que se mueven a la misma velocidad que la superficie con la que están en contacto; es decir, la velocidad cerca de la placa fija es cero, en tanto que el líquido cerca de la placa superior crece linealmente y se estará moviendo a velocidad  $v$  en m/s, resultando en un gradiente de velocidad dentro del fluido. La capa de fluido estacionaria retarda el flujo de la capa justo sobre ella, lo que a la vez retarda el flujo de la capa

siguiente, y así sucesivamente. Este comportamiento se denomina newtoniano puesto que sigue la ley de Newton de la viscosidad.

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

La curva de flujo para un fluido newtoniano, es decir la gráfica donde se representa el esfuerzo cortante  $\tau$  frente al gradiente de velocidad  $\dot{\gamma}$  será una línea recta con pendiente  $\eta$  como se aprecia en la Figura 2.4. Como se puede ver el valor de la viscosidad ( $\eta$ ), es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, la cual es constante para cualquier valor aplicado.

Figura 2.4 — Comportamiento Típico de un Fluido Newtoniano



Fuente: Realizado por Maribel

En reología, el conocimiento de cómo se reproduce el deslizamiento de capas de un producto es la clave para conocer su comportamiento al flujo y su estructura. La inducción del movimiento de placas unas sobre otras provocando el flujo entre planos paralelos se utiliza normalmente para definir el esfuerzo cortante, el gradiente de velocidad y la viscosidad, conceptos que se corresponden respectivamente con la intensidad de deformación aplicada y la intensidad de respuesta del material.



## 2.6 VISCOSIDAD ( $\eta$ )

La medición de la viscosidad es a menudo muy importante para el control de la calidad, sobre todo de productos que se supone deben tener una cierta consistencia en relación a su aspecto o paladar, como son las natas, yogurt, salsas de tomate o flanes. En muchas operaciones de la industria alimentaría es esencial conocer la viscosidad del flujo bajo tratamiento, de modo que pueda escogerse el equipamiento más apropiado. Esto ocurre en particular en aquellos procesos que implican calentamiento, enfriamiento, homogeneización y concentración, así como durante muchas fermentaciones industriales mediante hongos,

### 2.6.1 Definición

La viscosidad es una propiedad de los líquidos que describe la magnitud de la resistencia interna al flujo, esto es, la resistencia a la deformación, originada por fuerzas de corte o cizalla entre capas adyacentes del fluido conforme las capas se mueven unas sobre otras. El coeficiente de viscosidad es, por tanto, un término cuantitativo; se define como esfuerzo cortante o tensión de cizalladura  $\tau$ , dividida por la velocidad de deformación (gradiente de velocidad o cizalladura)  $\dot{\gamma}$ , adaptada por el fluido.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

### 2.6.2 Unidades

Las unidades de viscosidad más utilizadas son los milipascales por segundo [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ]. se debe tener en cuenta que:

$$1000\text{mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

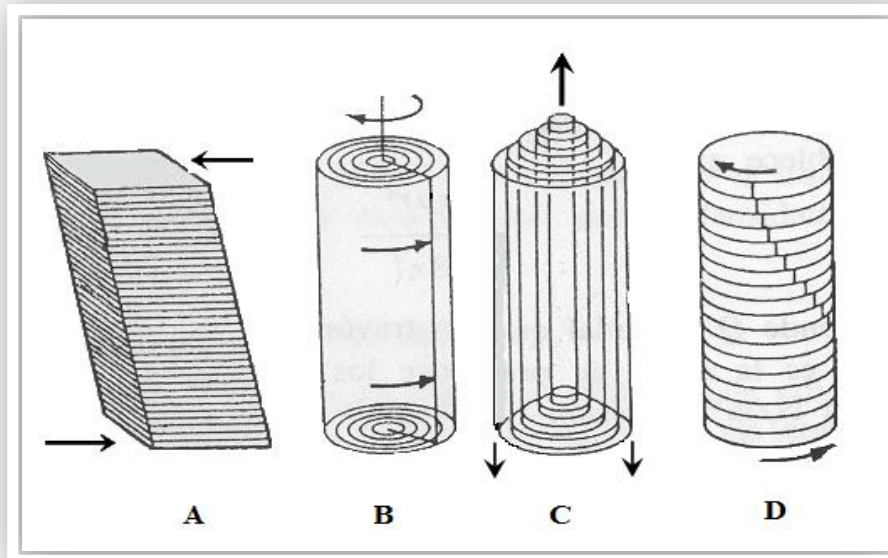
Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de media el centiPoise [cp]. La conversión de unidades entre dos sistemas es:

$$1 \text{ cp} = 1 \text{ m Pa} \cdot \text{s} \quad 1 \text{ Poise} = 1 \text{ g/cm} \cdot \text{s}$$

### 2.6.3 Determinación de la Viscosidad

En el apartado 2.5 Fluidos Newtonianos p. 28, se estableció que conviene visualizar un fluido como un conjunto infinito de láminas muy finas. En la deformación por cizalladura (corte), estas láminas se deslizan unas sobre otras con un desplazamiento relativo de las mismas. Se puede establecer, por ello, que las medidas de viscosidad se basan en cuatro tipos de deformación, mostrados en la Figura 2.5, que son: (A) Empujón a un montón de cartas colocada sobre una mesa. (B) Torsión de un equipo de taladracorchos. (C) Empujón a un equipo de taladracorchos. (D) Torsión de una pila de Monedas.

Figura 2.5 — Visualización de Cuatro Tipos de Cizalladura



Fuente: Extraído de Mueller, H.G. *Introducción a la Reología de los alimentos*. p. 51

Se debe resaltar que, ni en (B) ni en (D) se producen cambios de forma o volumen. Todo los métodos de determinación de la viscosidad de un líquido se basan en un solo concepto: la “fuerza” motriz es igual a la constante material (viscosidad) multiplicado por algún factor que exprese la geometría instrumental (que se calcula o determina, por calibrado contra una sustancia patrón) y otro que exprese el cambio, o velocidad de cambio, de la forma del material (la muestra en la que se efectúa la medición).

Existen cinco métodos básicos prácticos para determinar la viscosidad de un líquido. Son los siguientes: a) flujo del líquido a través de tubos, b) velocidad del descenso de un cuerpo sólido a través del líquido, c) viscosímetros rotacionales d) viscosimetríavibracional, e) técnicas empíricas. Algunos de ellos se mencionan en el apartado 2.12 Aparatos de Medición.

#### **2.6.4 Viscosidad Aparente ( $\eta_{ap}$ )**

Es la relación entre la tensión y la velocidad de deformación calculada a partir de medidas de fuerzas y velocidades en un fluido no newtoniano. Si se trata de un líquido no newtoniano, la velocidad aparente depende del tipo y dimensiones del aparato utilizado.

#### **2.6.5 Viscosidad Cinemática ( $\nu$ )**

Es la viscosidad dinámica de un fluido dividida por su densidad.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Representa la difusividad de la cantidad de movimiento. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst]. 1 stoke = 100 centistokes = cm<sup>2</sup>/s

### **2.7 ESFUERZO DE CORTE O CIZALLA ( $\tau$ )<sup>9</sup>[2]**

El esfuerzo Cortante se define como la relación entre la fuerza **F** que se requiere para que una unidad de área **A** de una sustancia se deslice o cizalle sobre otra, donde la fuerza es paralela al área. Entonces,  $\tau$  una fuerza dividida entre un área y se mide en las unidades N/m<sup>2</sup> (Pa) o lb/pie<sup>2</sup>.

$$\tau = \frac{F}{A} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

---

<sup>9</sup> El Comité de la Sociedad de Reología, recomienda que el símbolo  $\sigma$  se use para expresar el Esfuerzo de Cizalla (Shear Stress). Sin embargo, el símbolo  $\tau$  (tau), el cual fue usado mucho tiempo es aun encontrado comúnmente en la literatura reológica.

## **2.8 VELOCIDAD DE CORTE O CIZALLADURA ( $\dot{\gamma}$ ) [2]**

Es el cambio de la velocidad  $v$  de un elemento de fluido dividido por la distancia  $y$  entre las dos placas, se define como gradiente de velocidad ( $\delta v/\delta y$ ), aunque también se conoce como, velocidad de deformación, se expresa en segundos a la menos uno.

$$\dot{\gamma} = \frac{\delta v}{\delta y} = \frac{\text{cm/s}}{\text{cm}} = \text{s}^{-1}$$

## **2.9 FLUIDOS NO NEWTONIANOS**

Los fluidos que no siguen la ley de Newton y se caracterizan porque el valor de la constante que se ha definido como viscosidad, varía con el gradiente de velocidad, con el tiempo de aplicación del esfuerzo o con ambos. Si se cambia el gradiente de velocidad, cambiará la viscosidad. En general, las altas concentraciones y las bajas temperaturas inducen o incrementan el comportamiento no-Newtoniano.

Además de ser dependientes del gradiente de velocidad, es importante clasificar los fluidos no newtonianos en independientes del tiempo o dependientes del tiempo, como su nombre lo dice, los fluidos independientes tienen una viscosidad que no varía con el tiempo, a cualquier esfuerzo cortante dado. Sin embargo, la viscosidad de los fluidos dependientes del tiempo cambia si varía éste.

### **2.9.1 Fluidos no-Newtonianos Independientes del Tiempo**

Este tipo de fluidos como su nombre lo indica se caracterizan por que la viscosidad no varía con el tiempo, sólo depende de la temperatura, de la composición del fluido y del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último. Las suspensiones densas, lodos, emulsiones, soluciones de polímeros de cadena larga, fluidos biológicos, pinturas, suspensiones de arcillas y mezclas de hormigón son,

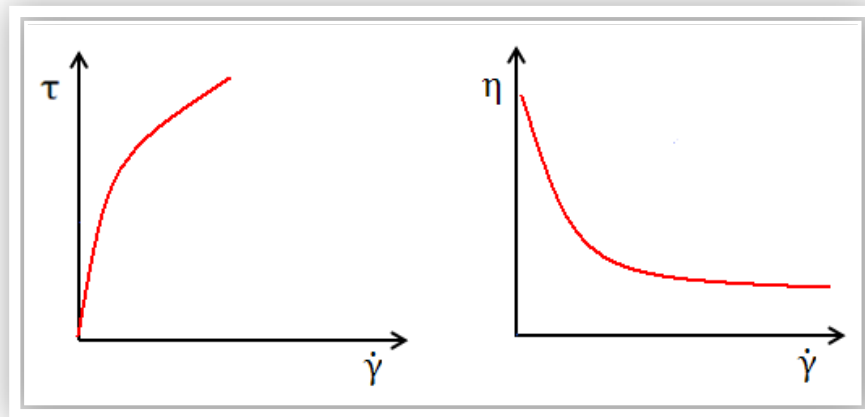
en general, no-Newtonianos. Dentro de esta gama de fluidos no newtonianos los más característicos son: los fluidos pseudoplásticos, fluidos reoespesantes y los plásticos.

### 2.9.1.1 Fluidos Pseudoplásticos (Shear-Thinning)

Se caracterizan porque su viscosidad disminuye a medida que aumenta el gradiente de velocidad, es decir,  $n < 1$ . La viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de deformación de cizalla pero no del tiempo al que están sometidos al esfuerzo cortante.

La velocidad de deformación aumenta en proporciones más altas que la tensión tangencial, de manera que la viscosidad  $\eta$  desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación. A cada valor de  $\tau$  le corresponde otro de  $\dot{\gamma}$  y a la inversa, como se puede observar en la Figura 2.6. Este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular así como a la dispersión de sólidos en la fase sólida.

Figura 2.6 — Representación gráfica de un fluido Pseudoplástico



Fuente: Extraído de Baun B. David, et all. . Rheology Modifiers Handbook  
*Practical Use and Application* p. 21.

Cuando más fuerte se bate un fluido pseudoplástico más decrece su viscosidad. Es el caso de algunas soluciones de hidrocoloides (proteínas y gomas), polímeros de disolución, tinta de impresiones, compotas, mayonesas, pulpas de papel; etc.

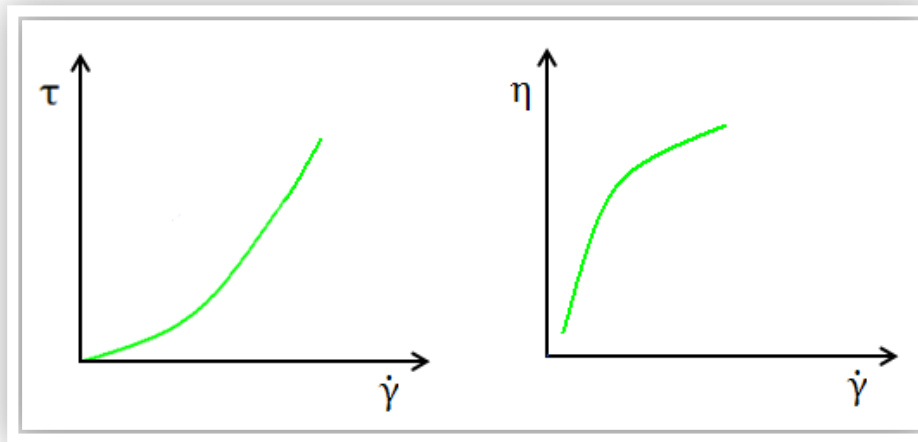
### 2.9.1.2 Fluidos Reoespesantes (*Shear-Thickening*)

Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo que se da a altas velocidades de deformación. Se caracteriza porque la viscosidad aumenta a medida que lo hace el gradiente de velocidad, es decir,  $n > 1$ , lo contrario que ocurre en la pseudoplásticidad.

Cuando el fluido se somete a un cizallamiento, las moléculas se estiran y alinean perpendicularmente a la dirección del flujo, a consecuencia de lo cual aumenta la viscosidad aparente, por reaccionar contra la corriente.

El alineamiento ocurre de un modo casi instantáneo y desaparece también con idéntica rapidez cuando cesa la fuerza de cizallamiento. El gráfico representativo de este comportamiento se puede apreciar en la Figura 2.7. Algunas mieles, soluciones de almidón y dispersiones con alto contenido en sólidos son reoespesantes.

Figura 2.7 — Representación gráfica de un fluido Reoespesante

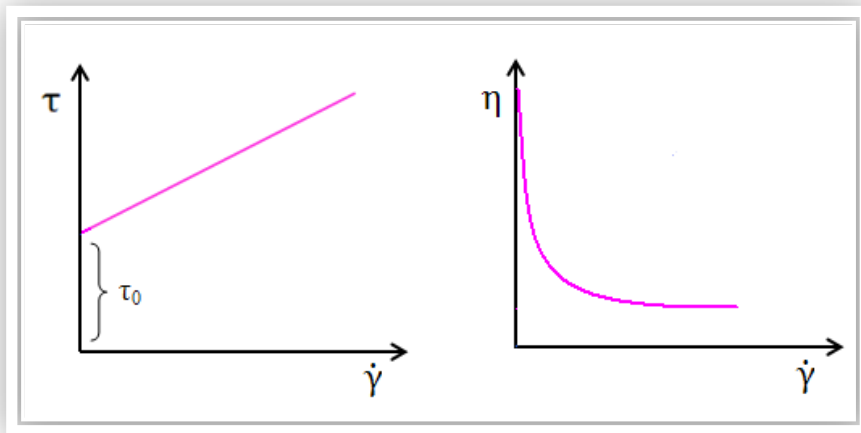


Fuente: Extraído de Baun B. David, et all. . Rheology Modifiers Handbook  
*Practical Use and Application* p. 24

### 2.9.1.3 Plásticos de Bingham [2,4]

Son fluidos a los que es preciso someterlos a un esfuerzo de corte superior a un valor umbral<sup>10</sup> para que en su seno exista un gradiente de velocidad no nulo, y empiecen a fluir, una vez que el flujo inicia, la pendiente de la curva es lineal, en esencia, lo que indica una viscosidad constante, manteniendo un comportamiento análogo al de los fluidos newtonianos. El reograma para este tipo de flujo se muestra en la Figura 2.8.

Figura 2.8 — Representación Gráfica del plástico de Bingham



Fuente: Extraído de Baun B. David, et all. . *Rheology Modifiers Handbook Practical Use and Application* p. 21.

Se puede apreciar que la viscosidad se acerca a infinito (ej. un sólido), conforme la velocidad de cizalla se aproxima a cero. El fluido actúa como un sólido elástico, si la aplicación del esfuerzo cortante está más abajo del esfuerzo umbral, si el esfuerzo excede el valor del umbral el material se comportara como un fluido.

Cabe citar como ejemplos las pastas, y suspensiones finas (partículas de combustibles nucleares en agua pesada, rocas o arcillas en agua, etc.), mantequilla, mantequilla de

<sup>10</sup> El valor umbral ( $\tau_0$ ) se puede definir como el esfuerzo de cizalla mínimo necesario para iniciar el flujo.

cacahuete, arcilla, pastas dentífricas, grasas, jabones, mostaza, mayonesa, pintura, asfalto, ceniza o fango del drenaje.

La ecuación matemática para éste fluido es:

$$\tau = \tau_0 + \eta' \dot{\gamma}$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\tau_0$  es el esfuerzo umbral requerido para que el flujo se ponga en movimiento.  $\eta'$  es llamada la viscosidad de Bingham y  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de cizalla. El método más común de obtener un valor de umbral es mediante la extrapolación de las curvas de tensión de cizalla *versus* gradiente de deformación.

### **2.9.2 Fluidos no-Newtonianos Dependientes del Tiempo**

Presentan la característica común de modificación progresiva de su estructura por aplicación de un esfuerzo, entendiendo dicha modificación en el sentido de destrucción-regeneración, es decir, ocurre en ambos sentidos si bien uno de ellos (destrucción o regeneración), puede ser predominante.

Este tipo de fluidos se caracterizan por que la viscosidad de algunos fluidos depende no solo de la velocidad de deformación sino también, y de forma simultánea, del tiempo que se mantiene la deformación y se clasifican en *tixotrópico* y *reopéctico*.

Cuando un material que ha estado en reposo durante un tiempo suficiente para reconstruir su estructura es sometido a un gradiente de velocidad, su estructura puede ser destruida progresivamente, de forma que su viscosidad disminuye.

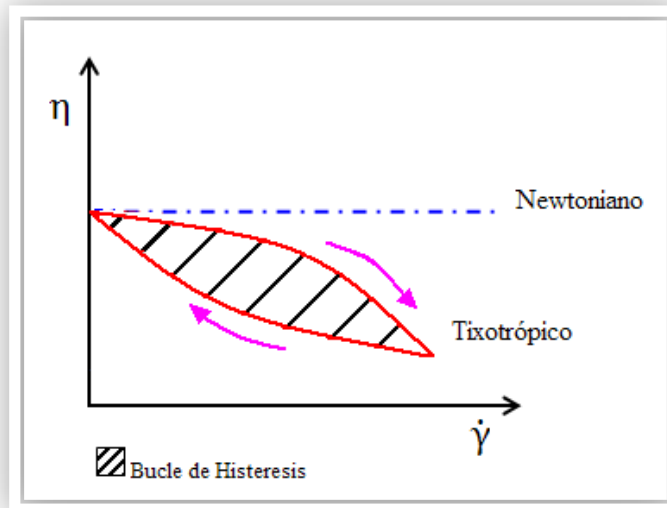
Del mismo modo, el valor de la velocidad de regeneración de la estructura aumentará con el tiempo, conforme aumente el número de posibles nuevos enlaces. Se alcanzará un estado de equilibrio dinámico, para cada valor fijo del gradiente, cuando ambos valores de velocidad se igualen, de esta forma la viscosidad dependerá simultáneamente del gradiente de velocidad y del tiempo de aplicación.



### 2.9.2.1 Fluidos Tixotrópicos.

El comportamiento de un fluido tixotrópico puede ser descrito como un sistema pseudoplástico, se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo cortante. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas. Estos cambios estructurales hacen que disminuya la viscosidad con el aumento de la velocidad de cizalla y que ésta esté muy influenciada por el tiempo. Cuando la velocidad de deformación desciende, el producto se espesa lentamente hasta recuperar gradualmente su estado inicial tras un tiempo de reposo. Debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio, parece un fenómeno de *Histéresis*.<sup>11</sup>, el gráfico que representa a este tipo de fluido se puede ver en la Figura 2.9.

Figura 2.9 — Representación gráfica de un Fluido Tixotrópico



Fuente: Extraído de Baun B. David, et all. . Rheology Modifiers Handbook  
*Practical Use and Application* p. 25

<sup>11</sup> Es un proceso de deformación en el que las curvas de carga y descarga no coinciden, por lo que forman un bucle. Esto se debe bien a la viscosidad bien a la plasticidad del material

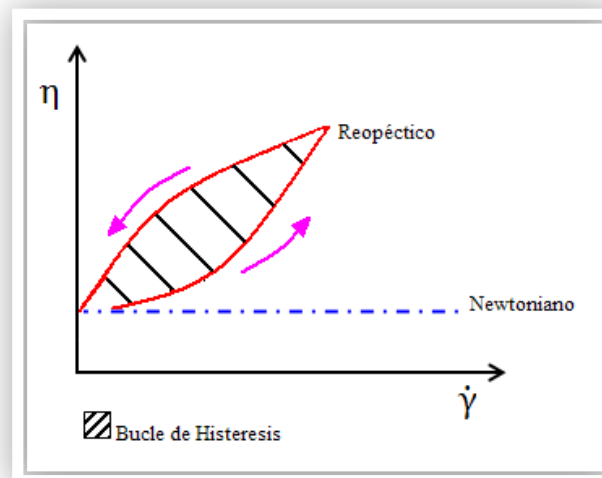
Este comportamiento al flujo lo presentan todos los sistemas gelificantes. Ejemplos típicos son el yoghurt, la mayonesa, la margarina y los helados de crema, manteca vegetal, aderezos para ensaladas, etc.

### 2.9.2.2 Fluidos Anti tixotrópicos o Reopécticos

Los fluidos reopécticos, en cambio, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta progresivamente con el tiempo y con el gradiente de velocidad aplicado y presentan una histéresis inversa a estos últimos, como se puede observar en la Figura 2.10. Lo que les confiere una cierta semejanza a los fluidos reoespesantes en el sentido de que la única diferencia es, si el tiempo para la destrucción o formación de estructura es detectable o no.

Esto es debido a que un cuerpo es deformable porque su energía de cohesión, debida a las interacciones interatómicas e intermoleculares, es finita y por consiguiente puede ser superada al aplicársele un esfuerzo suficientemente grande conllevando a un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

Figura 2.10 — Representación gráfica de un Fluido Reopéctico



Fuente: Extraído de Baun B. David, et all. . Rheology Modifiers Handbook  
*Practical Use and Application* p. 25

Las imperfecciones en los arreglos tridimensionales de los átomos, característicos de los sólidos cristalinos, proveen mecanismos de deformación basados en la movilidad interna a nivel molecular, los cuales implican cambios en la cantidad de energía requerida para deformar el material. Por ejemplo, si se trata de un sólido cristalino, la presencia de imperfecciones y dislocaciones en el arreglo cristalino tenderá a disminuir la energía requerida para deformar el material a tensión, pero tenderá a aumentar la energía para deformar el material por impacto. En el caso de líquidos y gases, las energías de cohesión son cada vez menores y por consiguiente estos cuerpos son más fácilmente deformables bajo ciertos esfuerzos

Los productos reopécticos son muy raros. Sin embargo, las soluciones de almidón, algunos coloides, soles, bentonitas y el yeso, por ejemplo, se encuentran entre ellas.

### ***2.10 SUSTANCIAS VISCOELÁSTICAS [11, 40]***

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez propiedades de sólidos elásticos y de fluidos viscosos. Al cesar el esfuerzo cortante se recupera parte de la deformación.

El uso de modelos mecánicos puede ser útil para obtener información acerca del comportamiento viscoelástico. Estos modelos se construyen a partir de la combinación de elementos de sólido de Hooke (H), representados por resortes y elementos viscosos (N) representados por sistema émbolo-pistón (amortiguador). El modelo más simple puede representarse por medio de un muelle y un resorte lleno de líquido con un émbolo que se mueve alternativamente en sentido ascendente y descendente.

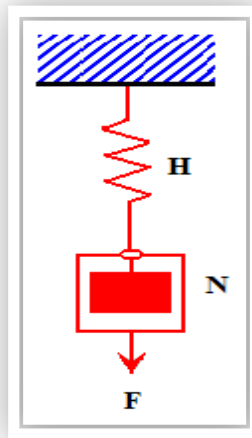
Acoplados en serie, representan esencialmente un líquido, y el modelo suele denominarse modelo Maxwell, en paralelo representan un sólido y se le conoce como modelo Kelvin-Voigt. Ambos modelos pueden acoplarse a su vez en serie para dar otro cuyas características se parecen muy considerablemente a la de diversos productos

alimenticios, llamado modelo Burgers. Como ejemplo de viscoelásticos están la sangre, la nata de leche, geles de gelatina y almidón, helados, espumas de proteínas, etc.

### 2.10.1 Modelo de Maxwell <sup>[11]</sup>

Consta de un muelle y un émbolo unidos en serie y representa el líquido visco-elástico ideal, en el que la aplicación de la menor fuerza producirá un flujo, como se puede observar en la Figura 2.11.

Figura 2.11 — Modelo de Maxwell



Fuente: Realizado por Maribel

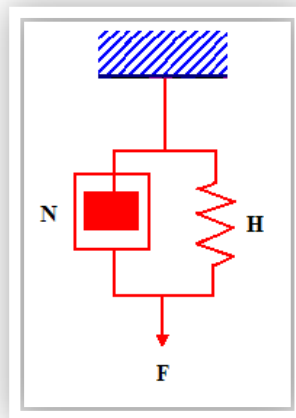
Al aplicar una fuerza  $F$ , el resorte ( $H$ ) se alarga de inmediato admitiendo una cierta cantidad de deformación elástica y luego lo hace el elemento viscoso ( $N$ ) lentamente. Al retirar la fuerza,  $H$  se contrae mientras que  $N$  permanece constante. Los materiales viscoelásticos son esencialmente líquidos y para un esfuerzo dado la deformación puede alcanzar cualquier valor, dependiendo del tiempo de aplicación. Una vez alcanzado un cierto valor de deformación esta se mantiene constante y el esfuerzo se disipa gradualmente hasta desaparecer; una vez alcanzada cierta elongación, se fijase el extremo exterior del resorte, éste se acortaría hasta su longitud inicial mientras el cilindro se alargaría para suplir el acortamiento del resorte.

El tiempo en el que esto sucede, durante el cual existen esfuerzos en el interior del sistema que van decreciendo progresivamente hasta anularse, se denomina tiempo de relajación.

### 2.10.2 Modelo de Kelvin-Voigt <sup>[11]</sup>

En el modelo de Kelvin-voigt, los dos elementos que intervienen en el de Maxwell se acoplan en paralelo; representando un sólido viscoelástico. El alargamiento límite, tras un período de tiempo suficientemente largo, depende exclusivamente de la magnitud de la fuerza y el totalmente recuperable cuando la carga cesa ver Figura 2.12.

Figura 2.12 — Modelo de Kelvin-Voigt



Fuente: Realizado por Maribel

Cuando se aplica una fuerza  $F$ , aumentan tanto  $H$  como  $N$ , Cuando la fuerza cesa,  $H$  a corta lentamente a  $N$ , lo que da origen al fenómeno conocido como elasticidad retardada de una deformación elástica, teóricamente, en este modelo la recuperación tarda un tiempo infinito en producirse; el tiempo para la recuperación efectiva depende del tamaño relativo de las constantes de los elementos viscoso y plástico. A diferencia del modelo de Maxwell, el de Kelvin-Voigt tiene acoplados sus elementos en paralelo, en el de Maxwell, los dos elementos soportan la misma tensión, como dos eslabones de una

cadena, el alargamiento total es por tanto la suma de los de cada elemento. En el modelo de Kelvin-Voigt ambos elementos sufren la misma deformación relativa y la tensión es la suma de las tensiones de cada elemento. Es, por tanto evidente que aunque ambos modelos, el de Maxwell y el de Kelvin-Voigt, ofrezcan un solo H y un solo N las ecuaciones apropiadas a los dos sistemas deben de ser distintas.

### 2.11 MODELOS FUNCIONALES PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS [14]

Un modelo Funcional puede ser considerado una ecuación matemática que puede describir datos reológicos, partiendo del hecho de que todos los fluidos presentan funciones materiales derivadas de la aplicación de la mecánica de fluidos y los fenómenos de transporte. En muchos procesos industriales, la viscosidad es la propiedad reológica más importante, pero que por cuestiones de simplicidad y práctica es muy difícil de estimar e interpretar para cálculos de tipo ingenieril, por lo que se recurre a las ecuaciones matemáticas para su cálculo. Algunos modelos funcionales que se describen en un diagrama de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) vs velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ), se enlistan en la Tabla 3 [15]

Tabla 3 — Modelos Funcionales que describen el comportamiento de los fluidos.

MODELO	ECUACIÓN
$\sigma = \eta \dot{\gamma}$	Modelo Newtoniano
$\sigma = \frac{\dot{\gamma}}{\left[ \frac{1}{\eta_0} + K_E (\sigma)^{(1/n_E)-1} \right]}$	Modelo de Ellis (1927)
$\sigma = [\eta_\infty \dot{\gamma} + K_s \dot{\gamma}^{n_s}]$	Modelo de Sisko
$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\alpha_c \dot{\gamma})^m}$	Modelo de Cross (1965)

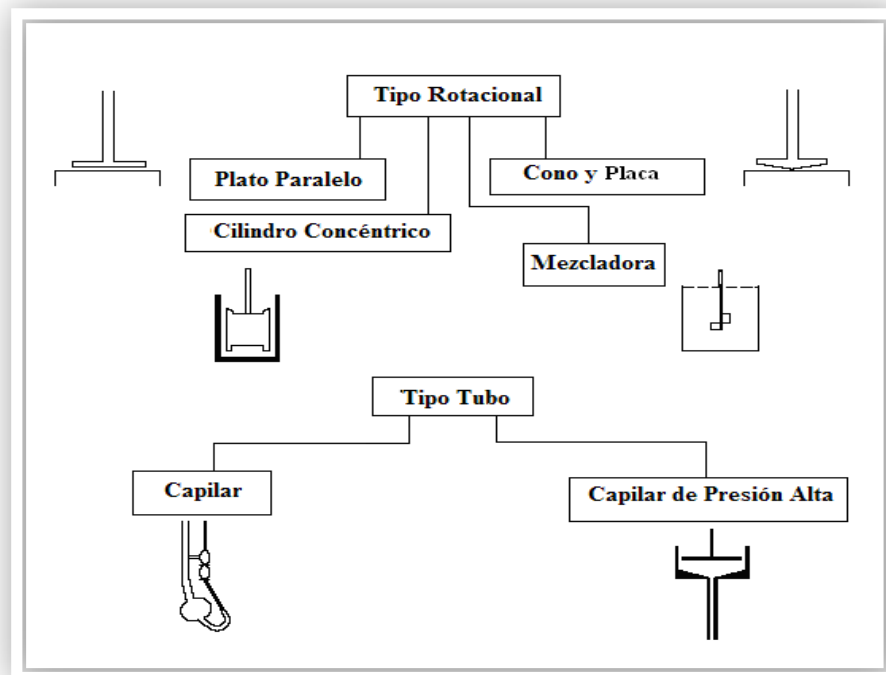
Continuación de la Tabla 3 —Modelos Funcionales que describen el comportamiento de los fluidos.

$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\alpha_c \dot{\gamma})^m}$	<b>Modelo de Cross (1965)</b>
$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^2]^N}$	Modelo de Carreau (1968)
$\sigma = K \dot{\gamma}^n$	Ley de la Potencia
$\sigma - \sigma_0 = \dot{\eta} \dot{\gamma}$	Modelo de Bingham
$\sigma - \sigma_0 = K_H (\dot{\gamma})^{n_H}$	Modelo de Herschel-Bukley (Ofoli et al. 1987)
$\sigma^{0.5} = K_{0c} + K_c (\dot{\gamma})^{0.5}$	Modelo de Casson (1959), usado principalmente para tratar datos en chocolates.
$\sigma^{0.5} - \sigma_{0M} = K_M \dot{\gamma}^{n_M}$	Modelo de Mizrahi y Berk (1972), una modificación del modelo de Casson.
$\sigma^{n_1} - \sigma_0^{n_1} + \eta_\infty (\dot{\gamma})^{n_2}$	Modelo generalizado de Ofoli et al. ( 1987).
$\sigma = [(\sigma_{0V})^{1/n_V} + K_V \dot{\gamma}]^{n_V}$	Modelo de Vocadlo (Parzonka y Vocadlo, 1968)
$\sigma = \left( \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + ((\sigma)^2 / K_1)} \right) \dot{\gamma}$	Modelo de Reiner - Philippoff (Philippoff, 1935)

## 2.12 APARATOS DE MEDICIÓN [20]

Existe una gran variedad de técnicas instrumentales de medida para determinar las propiedades reológicas de los materiales, pueden clasificarse en dos categorías generales: los de *Tipo Rotacional* y los de *Tipo Tubo*. Figura 2.13. El costo varía considerablemente desde los instrumentos económicos que miden únicamente viscosidades como los viscosímetros de vidrio capilar a los muy caros que miden propiedades reológicas como los reómetros, capaces de medir propiedades oscilatorias y analizar materiales a muy baja velocidad de cizalla.

Figura 2.13— Clasificación de los Instrumentos Reológicos



Fuente: Steffe F. James, *Rheological Methods in Food Process Engineering*; p. 50

### 2.12.1 Viscosímetros Tipo Tubo

En un viscosímetro de tubo, se determina el caudal de un material debido a un gradiente de presión conocido  $\Delta P$  o inversamente, el gradiente de presión correlacionado con un

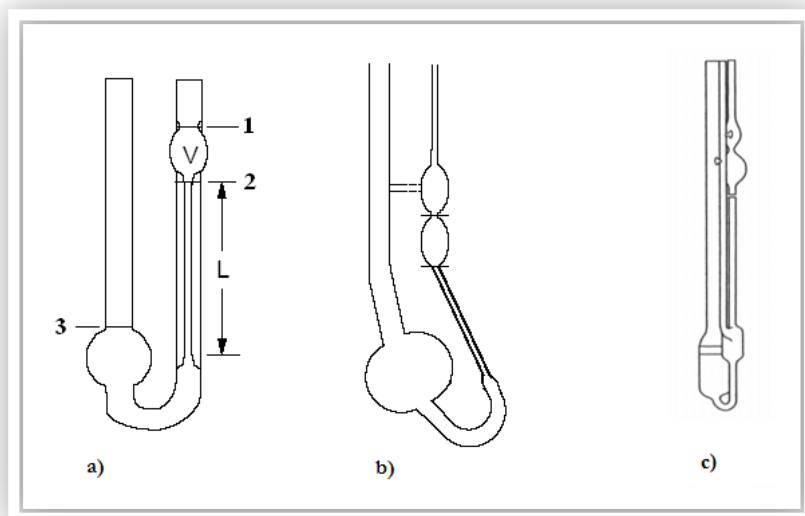


caudal conocido. Para líquidos diluidos, el flujo es debido mayoritariamente a la gravedad. Los viscosímetros de tubo son populares debido a que son baratos y fáciles de utilizar. La viscosimetría de tubo es un método muy exacto para la determinación de la viscosidad de líquidos newtonianos. Dentro de este grupo podemos mencionar a los viscosímetros capilares y los capilares de alta presión.

### 2.12.1.a Viscosímetro Capilar

Estos viscosímetros tienen normalmente la forma de un tubo en U. El diseño más simple es el de Ostwald, aunque existen distintas clases, como se puede apreciar en la Figura 2.14, pero todas funcionan siguiendo el mismo principio.

Figura 2.14 — Viscosímetros Capilares a) Ostwald b) Cannon-Fenske c) Ubbelohde



Fuente: Steffe F. James, Rheological Methods in Food Process Engineering; p. 94

El viscosímetro se llena con la solución que se desea evaluar hasta el nivel superior o marca 1, posteriormente el fluido se succiona rebasando la marca del bulbo a través de tubo capilar hasta la marca 2. Una vez que el fluido pasa a través del tubo capilar bajo la influencia de la presión hidrostática del mismo se registra el tiempo que tarda en pasar el fluido de la marca 2 a la 3 a través del tubo capilar. El tiempo transcurrido permite obtener la viscosidad mediante ley de Hagen-Poiseuille. Donde  $\eta$  es la viscosidad,  $r$  es el

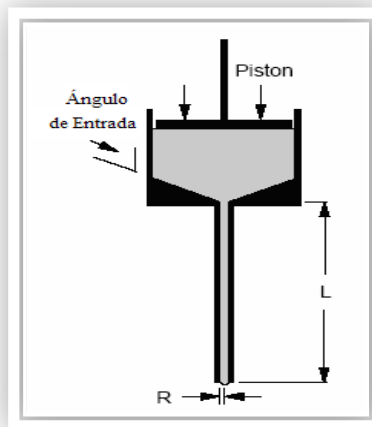
radio del capilar,  $\Delta P$  es la caída de presión a lo largo del capilar,  $V$  es el volumen del líquido,  $t$  es el tiempo del flujo,  $L$  es longitud del capilar.

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8 V L}$$

### 2.12.1.b Viscosímetro Capilar de Alta Presión.

El material a ensayar es cargado dentro de un cilindro y aplicando un gas a presión o utilizando un pistón, se fuerza un volumen determinado del fluido a pasar a través de un capilar de vidrio de pequeño diámetro, bajo condiciones definidas. Se fijan la temperatura y la velocidad del pistón o gas. Para calcular la viscosidad se determina la temperatura del material, la presión del material y la duración del ensayo. Un viscosímetro de este tipo se muestra en la Figura 2.15.

Figura 2.15 — Viscosímetro Capilar de Alta Presión



Fuente: Steffe F. James, *Rheological Methods in Food Process Engineering*; p. 95

### 2.12.2 Viscosímetro Rotacional

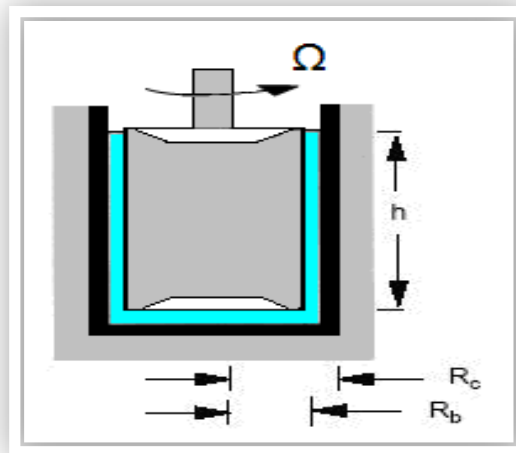
Estos viscosímetros son equipos muy versátiles que pueden estudiar el comportamiento reológico en cualquier rango incluso en fluidos con partículas en suspensión, son de gran

precisión, constan básicamente de dos partes que se encuentran separadas por el fluido a estudiar. Dichas partes pueden ser dos cilindros, dos superficies paralelas, una superficie y un cono de pequeño ángulo, un rotor en el interior de un cilindro. El principio aplicado en los viscosímetros rotacionales es tener una parte móvil giratoria y un cabezal que registre el par de torsión o troque producido por la resistencia al movimiento del fluido. Una gran ventaja de este tipo de reómetro es que la muestra se puede cizallar tanto como se desee, permitiendo el estudio del comportamiento dependiente del tiempo. Los viscosímetros rotacionales más empleados son: Viscosímetro de cilindros concéntricos, Viscosímetros de placas paralelas y Viscosímetros de cono-placa.

### 2.12.2.1 Viscosímetros de Cilindros Concéntricos

Un viscosímetro de cilindros concéntricos, consta de dos cilindros, uno exterior hueco y otro interior macizo con un estrecho espacio entre ellos, como se muestra en la Figura 2.16. El fluido cuya viscosidad desea medirse se coloca en el hueco. Cuando este cilindro rota, se establece un gradiente de velocidad y el fluido transmite un par de torsión al segundo cilindro, arrastrándolo tras de sí.

Figura 2.16 — Viscosímetro de Cilindros Concéntricos



Fuente: Vega Román, *Variación de las Propiedades Reológicas de la Formulación de una Crema*. Tesis 2007. UNAM

El aparato dispone de algún sistema de medida de la fuerza o el par ejercido sobre el segundo cilindro. El fluido puede ser caracterizado de dos maneras, en términos del par (en relación con la fuerza de cizalla) y la velocidad angular (relacionada con el gradiente de cizalla). Ambos métodos ya fueron estudiados y sus fundamentos fueron introducidos por Couette en 1888, en cuyo honor, el flujo provocado entre los cilindros, se denomina *Flujo de Couette*.

Un viscosímetro de este tipo, cumple la ecuación siguiente para un radio dado.

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 h}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo de Deformación o Esfuerzo de Cizalla

$d\gamma / dt$  = Velocidad de Deformación o Velocidad de Cizalla

$M$  = Par de Fuerzas aplicado por unidad de longitud de cilindro sumergido en el fluido

$\omega = 2\pi/60N$ , donde N es la velocidad angular en rpm

$R_c$  = Radio del Contenedor de la Muestra

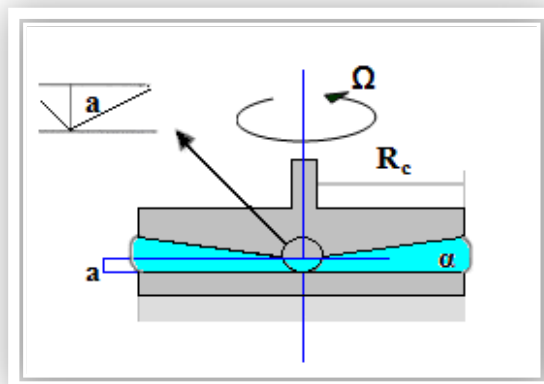
$R_b$  = Radio del Cuerpo de Giro

$h$  = Altura

### 2.12.2.2 Viscosímetros de Cono y Plato

Su funcionamiento se basa en la cizalla presente en un líquido situado en el espacio comprendido entre un cono y una placa, siendo el ángulo ( $\alpha$ ) entre ambos muy pequeño (inferior a 5° grados y puede llegar a ser tan pequeño hasta valores de 0.3°), ya que para ángulos mayores, los cálculos se complicarían excesivamente). Si el cono gira con cierta velocidad angular ( $\Omega$ ), se generará un movimiento de rotación en el fluido de tal forma que éste girará a una velocidad mayor cerca de las paredes del cono. En la Figura 2.17, se muestra un viscosímetro de geometría cono y plato.

Figura 2.17 — Viscosímetro de Geometría de Cono y Plato



Fuente: Vega Román, *Variación de las Propiedades Reológicas de la Formulación de una Crema*. Tesis 2007. UNAM

En la mayoría de los viscosímetros rotacionales la velocidad de cizalla cambia con la distancia al centro de rotación. Sin embargo, en el viscosímetro de cono-placa la velocidad de cizalla a lo largo del espaciado del cono es constante, ya que el espaciado entre el cono y el plato aumenta al aumentar la distancia al centro. Para fluidos no newtonianos no es necesario llevar acabo correcciones, siendo posible aplicar las ecuaciones para fluidos newtonianos:

$$\eta = \frac{3\alpha M}{2R_c^3} \tau = \frac{3M}{2\pi R_c^3} \dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo de Deformación o Esfuerzo de Cizalla

$d\gamma/dt = \dot{\gamma}$  = Velocidad de Deformación o Velocidad de Cizalla

$R_c$  = Radio del Cono

$M$  = Par de Fuerzas Aplicado

$\Omega$  = Velocidad Angular del Cono

$\alpha$  = Ángulo del Cono

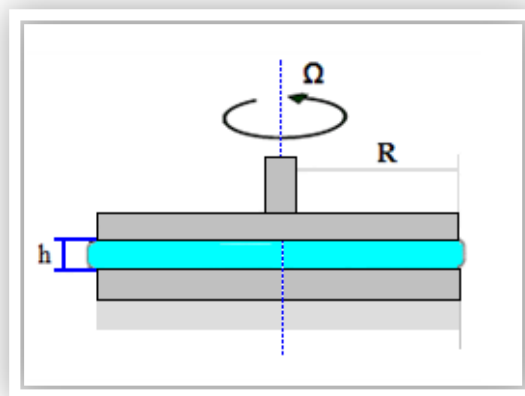
Las geometrías de medición de cono y placa son muy adecuadas para el ensayo de muestras pequeñas. Los materiales que contienen partículas grandes no se pueden estudiar con la geometría de cono y placa. Debido a las distancias pequeñas entre el cono y la placa. Todos los instrumentos de cono-placa permiten extraer el cono para un cambio de la muestra, lo que facilita en muchos casos la limpieza del mismo, siendo ésta, junto con la pequeña cantidad de muestra que se utiliza, las principales ventajas que presentan este tipo de equipos.

### 2.12.2.3 Viscosímetros de Platos Paralelos

En este caso el fluido se encuentra entre dos placas paralelas de igual diámetro, la superior gira y la inferior permanece inmóvil. Los elementos de fluido cercanos a la placa móvil tendrán una velocidad superior a la que tienen los que se encuentran próximos a la placa fija.

De este manera la cizalla se produce desde la placa de abajo hacia la de arriba. Como se puede ver en la Figura 2.18. Al igual que en los viscosímetros de cono-placa, este tipo de instrumentos son fáciles de limpiar y requieren pequeñas cantidades de muestra. La capacidad de fijar el espesor de muestra (GAP) de acuerdo a las características de la misma es una ventaja en suspensiones de partículas de gran tamaño o en líquidos que tienden a ser expulsados fuera de las placas. Sin embargo la viscosidad de la muestra es difícil de evaluar ya que la velocidad de cizalla cambia de acuerdo a la distancia al centro de la placa.

Figura 2.18 — Viscosímetro de Geometría de Platos Paralelos



Fuente: Vega Román, *Variación de las Propiedades Reológicas de la Formulación de una Crema*. Tesis 2007. UNAM

En un viscosímetro de placas paralelas, se pueden calcular la velocidad de cizalla máxima y la viscosidad mediante las ecuaciones:

$$\dot{\gamma}_{max} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\Omega}{h} R$$

$$\eta = \frac{3M}{2\pi R^3(\dot{\gamma}_{max})} \left[ 1 + 3 \frac{d \ln M}{d \ln(\dot{\gamma})} \right]$$

Donde:

$\tau = f(r)$  = Esfuerzo de Deformación o Esfuerzo de Cizalla

$d\gamma/dt = \dot{\gamma}$  = Velocidad de Deformación o Velocidad de Cizalla

$h$  = Distancia entre Placas (GAP)

$M$  = Par de Fuerzas Aplicado

$\Omega$  = Velocidad de Giro

$\eta$  = Viscosidad Aparente

Esta geometría de medición es especialmente adecuada para el estudio de materiales cuya estructura debe ser perturbada lo menos posible o en absoluto mientras se está montando el reómetro; por ejemplo, materiales tixotrópicos o productos con un esfuerzo umbral, que puedan tardar en recuperarse.

## ***CAPÍTULO 3 – DESARROLLO EXPERIMENTAL***

---

Es de esperarse que la cantidad de pectina obtenida en un proceso de extracción dependa de la clase de materia prima, material, reactivos, equipos y método empleado; por lo que en este capítulo se mencionan los aspectos anteriores que fueron de gran relevancia para la realización de este trabajo experimental.

### ***3.1 MATERIA PRIMA***

La materia prima empleada en este trabajo fue la Guayaba de la variedad mediana china; se dispuso de este fruto ya que es el más comercial y por su tamaño mediano es de muy fácil manejo.

### ***3.2 MATERIAL***

En el proceso de la extracción de la pectina y la caracterización reológica, se emplearon materiales de vidrio y de plástico.

- ★ Pipeta volumétrica de 1 mL T 20° C
- ★ Probeta de 100 mL T 20° C
- ★ Vaso de precipitado de 1 L T 20° C
- ★ Vaso de precipitado de 250 mL T 20° C
- ★ Vaso de precipitado de 50 mL T 20° C
- ★ Mortero grande de 11 cm de diámetro con pistilo de 15 cm.
- ★ Coladeras de 14 cm y mallas de plástico de 16 cm de diámetro.
- ★ Cajas de petri de plástico de 10 cm de diámetro.
- ★ Termómetro de mercurio T -10° C a 260° C.
- ★ Molino de café
- ★ Varilla agitadora de 20 cm de largo
- ★ Tiras de papel pH indicador marca Watchman y algodón.
- ★ Vasija de plástico de 15 cm de diámetro.
- ★ Vaso de precipitado de 100 mL T 20° C
- ★ Espátulas de plástico y perilla
- ★ Vidrio de Reloj de 10 cm de diámetro
- ★ Matraz aforado de 500 mL
- ★ Matraz aforado de 2000 mL
- ★ Matraces de 50 mL T 20° C  $\pm$  0.006



### **3.3 EQUIPO**

- ★ Balanza Analítica marca Mettler Toledo Classic
- ★ Balanza Granataria(0.1 g)
- ★ Parrillas base de porcelana
- ★ Reómetro ( Par Physica LS 100) y geométrica Cono y plato MK-50.

### **3.4 REACTIVOS**

- ★ Alcohol Etílico de 96 °
- ★ Acido Clorhídrico (R.A)
- ★ Ácido Oxálico ( R.A)
- ★ Agua desionizada

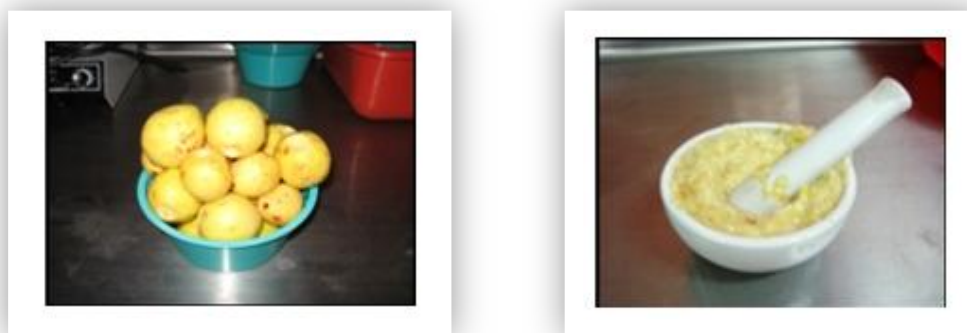
### **3.5 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN**

Para poder estudiar una sustancia química es necesario sintetizarla, extraerla y si es un producto natural o separarla si está contenida en una mezcla. Para caracterizar a la pectina debe extraerse y purificar. Se reportan varios métodos de extracción, tanto a nivel laboratorio como industrial para otras frutas y vegetales, y un método general de purificación. En donde se mencionan varios agentes extractantes que han sido empleados de manera general para obtener la pectina de los medios naturales:  $\text{HNO}_3$  (Soluciones acuosas desde 0.01 hasta 1.0 M),  $\text{NaOH}$  (Soluciones acuosas desde 0.01 hasta 1.0M),  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (soluciones acuosas desde 0.01 hasta 1.0 M) y/o hexametáfosfato de sodio (2.0%), Acido Oxálico (soluciones acuosas desde 0.01 hasta 1.0 M),  $\text{HCl}$ , entre otras.

### 3.5.1 Extracción de la pectina de la Guayaba utilizando Ácido Clorhídrico 0.01 M<sup>[26,27]</sup>

- a) Se lavaron 2 kg. de guayabas con la finalidad de retirar suciedad o alguna sustancia que pudieran traer. (las guayabas deben estar maduras es decir firmes y de un color uniforme). Con ayuda de la espátula de plástico o manualmente se cortan a la mitad y se ponen en el mortero para machacarlas hasta obtener una pulpa, la cual se deposita en una vasija de plástico. Ver Figura 3.0.

Figura 3.0 — Lavado de las Guayabas y Obtención de la Pulpa



Fuente: Fotografía Realizada por Maribel

- b) Con el vidrio de reloj se pesan 167 g de pulpa y se coloca en un vaso de precipitado de un litro, se preparan 500 mL de disolución de ácido clorhídrico 0.01 M y se vierte en el matraz para tener una relación pulpa: solución 3:1. Ver Figura 3.1.

Figura 3.1 — Relación pulpa: solución 3: 1, pH = 3



Fuente: Fotografía Realizadas por Maribel

- c) Se requiere de un pHmetro o de tiras de papel pH indicador, para medir el pH inicial de la solución con la pulpa, el cual debe ser de 3. En este caso se determinó un pH inicial de 4 y se procedió ajustarlo con Ácido clorhídrico (HCl)
- d) La mezcla se calienta en una parrilla a una temperatura de 90° C, con agitación constante por espacio de 60 minutos. Este procedimiento se realiza manualmente con la ayuda de una varilla de vidrio. *Cuando empieza a hervir la mezcla es cuando se tiene que empezar a contar la hora.* (Es importante que la mezcla se agite y que se mantenga a la temperatura establecida, ya que de lo contrario, se puede derramar). Transcurrido este tiempo, se deja enfriar hasta temperatura ambiente. Ver Figura 3.2.
- e) La mezcla se cuela con una coladera grande con la finalidad de retirar semillas y pulpa, posteriormente el filtrado se vuelve a colar con una coladera recubierta con algodón hasta obtener un líquido ligeramente café. Ver Figura 3.3.

Figura 3.2 — Mezcla calentada por 1 h a 90° C, con agitación constante



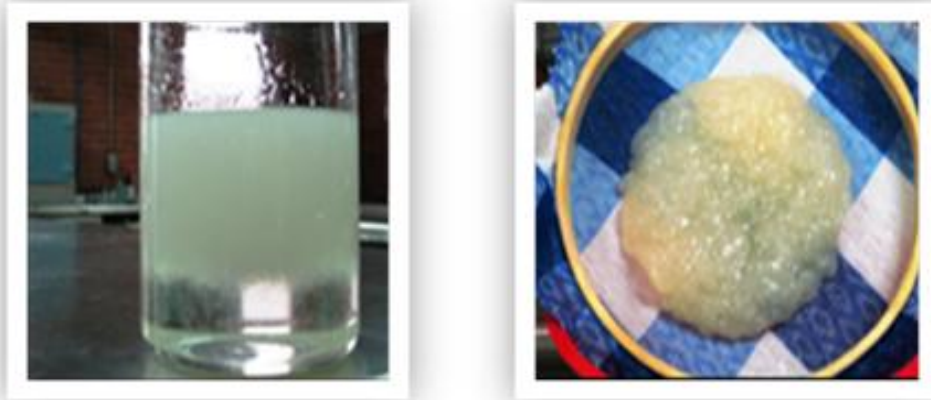
Figura 3.3 — Filtrado de la Pulpa



Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- d) Al extracto filtrado se le agregan 350 mL de alcohol etílico de 96°, inmediatamente se precipita un gel traslúcido, el cual se filtra con una malla y se deja escurrir durante una hora. Ver Figura 3.4.

Figura 3.4 — Precipitación del gel de pectina con alcohol y posterior recuperación



Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- e) La pectina obtenida se coloca en una caja de petri y se deja secar a temperatura ambiente, por aproximadamente una semana. Ver Figura 3.5.

Figura 3.5 — Pectina extraída con Ácido Clorhídrico 0.01 M



Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- f) La pectina seca se muele en un molino de café, se utiliza este molino ya que las láminas de pectina son muy duras y es un poco difícil molerla con un mortero

convencional, posteriormente para obtener un polvo más fino, se vuelve a moler en el mortero. Ver Figura 3.6.

Figura 3.6 — Láminas de pectina pulverizadas en el molino de café



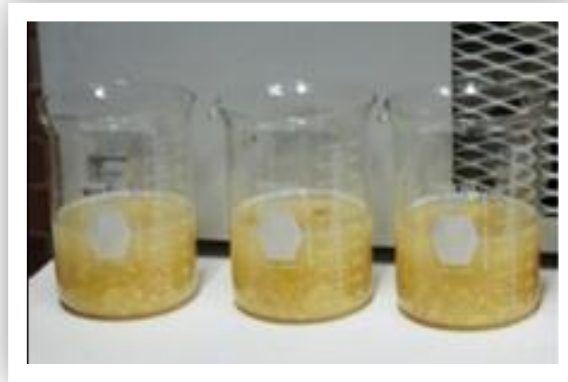
Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- g) El polvo obtenido se guarda cuidadosamente en un frasco limpio, etiquetado y bien cerrado.

### 3.5.2 Extracción de la pectina de la guayaba utilizando Ácido Oxálico 0.5%<sup>[17]</sup>

- a) Se siguen los pasos de los incisos a y b del método de extracción con Ácido Clorhídrico.
- b) Con el vidrio de reloj se pesan 167 g de pulpa y se coloca en un vaso de precipitado de un litro, se preparan 335 mL de la disolución de ácido oxálico al 0.5 % y se vierte en el matraz, para tener una relación pulpa: agua 2:1. En este caso se determinó un pH inicial de 2, pero este valor solo se toma como dato.
- c) La mezcla se deja reposar durante 48 hrs. Ver Figura 3.7. Transcurrido el tiempo de reposo, la mezcla se cuele con una coladera con la finalidad de retirar semillas y pulpa, posteriormente el filtrado se vuelve a colar con una coladera recubierta con algodón hasta obtener un extracto líquido claro y transparente.

Figura 3.7 — Mezcla relación pulpa: solución 2:1 en reposo durante 48 hrs



Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- d) Se siguen los pasos del inciso g del método anterior.
- e) La pectina obtenida se coloca en una caja de petri y se deja secar a temperatura ambiente, por aproximadamente una semana. Ver Figura 3.8.

Figura 3.8 — Pectina extraída con Ácido Oxálico al 0.5 %



Fuente: Fotografías Realizadas por Maribel

- f) Se siguen los pasos de los incisos i y j del método anterior.

### ***3.5.3 Purificación de la Pectina***

Esta operación se realizó para obtener una pectina libre de sustancias que interfirieran en su caracterización.

- a) Se redisuelve la pectina obtenida en agua desionizada y se obtiene de nuevamente el gel el cual se precipita con alcohol etílico de 96°, secar nuevamente a temperatura ambiente y moler la película.

### ***3.6 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LA PECTINA***

Para realizar la caracterización reológica de la pectina se utilizó un reómetro rotacional (PaarPhysica LS 100), como el que se muestra en la Figura 3.9, con un recirculador con etilén glicol para el control de temperaturas a las que se trabajaron que fueron de 5°C, 10°C, 25°C y 35°C; con geometría cono y plato MK-50.

Figura 3.9— Reómetro



Fuente: Fotografía Realizada por Maribel

### ***- Pectina sin Purificar***

Se prepararon soluciones de 25 mL de pectina de concentración 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5% y 4.0%. Estas concentraciones se prepararon por cada método de extracción.

### ***- Pectina Purificada***

Se prepararon soluciones de 25 mL pectina de concentración 0.5%, 1.5% y 3.0 %. Estas concentraciones se prepararon por cada método de extracción. En este caso solamente se analizaron tres concentraciones, ya que las soluciones quedaban muy viscosas por lo que era complicada su preparación. Cada corrida se realizó cinco veces, con cada concentración y temperatura. Se colocó una pequeña cantidad de pectina de concentración 0.5 % en dilución, en el plato del reómetro de manera que no sobrepasara al cono, pero cubriendo completamente su parte inferior, el tiempo aproximado de cada medición es de 25 minutos.

Todas las corridas se llevaron a cabo con el mismo programa. Las mediciones se realizaron con una velocidad de cizalla de  $1.0 \text{ s}^{-1}$  hasta  $300 \text{ s}^{-1}$ .



## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA EXTRACCIÓN

En la Tabla 4. Se presentan los resultados obtenidos después de aplicar los métodos anteriormente mencionados para la obtención de pectina a partir de la pulpa de guayaba.

Tabla 4 — Resultados del rendimiento de Pectina

METODO DE EXTRACCIÓN EMPLEADO					
Ácido Clorhídrico 0.01 M			Ácido Oxálico al 0.5 %		
Peso de pectina Seca (g)	% Rendimiento	Observaciones	Peso de pectina Seca (g)	% Rendimiento	Observaciones
3.0705	1.83	Se obtiene una pectina de color café claro  Ver Figura 3.5 p. 59	1.6923	1.01	Se obtiene una pectina de color blanco  Ver Figura 3.8 p.61
2.8492	1.70		1.6317	0.97	
3.3292	1.99		1.7983	1.07	
3.0118	1.80		1.4670	0.87	
2.9285	1.75		1.8958	1.13	
3.6552	2.19		1.0240	0.61	
3.1839	1.90		1.4628	0.87	
3.1503	1.87		1.8151	1.08	
3.0653	1.83		2.2965	1.37	
3.5111	2.10		1.4256	0.85	
2.8032	1.68		2.4463	1.46	
2.8292	1.69		2.7233	1.63	
3.1709	1.89		2.5153	1.50	
2.9782	1.78		2.4299	1.45	
2.9404	1.76		2.3850	1.42	
4.0748	2.44		2.5764	1.54	
3.9478	2.36		2.6406	1.58	
3.6980	2.21		2.4415	1.46	
3.6856	2.20		2.7313	1.63	
4.3938	2.63		2.7511	1.64	

Condiciones de los métodos: Concentración de ácido clorhídrico 0.01 M, volumen empleado 500 mL. Concentración de ácido oxálico 0.5 %, volumen empleando 335 mL, el peso de la pulpa empleada es de 167 g.

1. Como se observa en la tabla 4 p. 64, se obtiene un rendimiento de pectina de 2.63 %, con una Desviación Estándar de 0.4575, Ver Anexo 1 p. 86, empleando el método de extracción con Ácido Clorhídrico 0.01 M. Este método es relativamente sencillo ya que se somete la pulpa a una cocción en medio ácido, posterior filtración y purificación.
2. En algunos métodos que se reportan en la literatura <sup>[23,26]</sup>, el pH de la hidrólisis influye en el rendimiento de la extracción, el criterio de optimización varía con cada autor y probablemente el pH utilizado para esta extracción no fue el más adecuado, pero no hay que olvidar que el propósito de este proyecto fue la extracción de pectina de guayaba, lo cual se logró realizar.
3. Por otro lado con el método de extracción con ácido oxálico al 0.5 %, se obtuvo un rendimiento de 1.64 %, con una Desviación Estándar de 0.5324. Ver Anexo 1 p. 86. Es importante mencionar que algunas condiciones de extracción no se llevaron tal y como se mencionaba en los métodos encontrados en la literatura, ya que no se contaba con el equipo necesario para su reproducción en el laboratorio, sino que se adaptaron para poder llevarse a cabo. Aunque se utilizó una gran cantidad de etanol, para precipitar el gel de pectina, este fue recuperado mediante una destilación fraccionada.
5. Se obtuvo un gel muy firme por ambos métodos, aunque de diferente coloración ver Figuras 3.5 y 3.8 paginas 59 y 61. En la literatura, se propone que esta coloración es debida a posibles compuestos de coordinación formados por las moléculas de los diversos extractantes, no solo con las cadenas de las macromoléculas de pectina sino también con los iones que contienen estas, procedentes del contenido de la pulpa.
6. El fruto del guayabo se encuentra dentro del promedio de las frutas que contienen una mayor cantidad de pectina como son toronja, naranja, limón, tejocote, por lo tanto comparando el rendimiento que se obtuvo con los reportados en la literatura de acuerdo la tabla 1 es aceptable.

## **4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA**

Se construyeron las curvas viscosimétricas para cada una de las concentraciones de pectina de guayaba *sin purificar* y *purificada*, Ver Anexos 2-5. Donde se grafican los valores de viscosidad ( $\eta$ ) en función de la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ). De acuerdo a los datos obtenidos en el reómetro (PaarPhysica LS 100).

En este apartado, se discutirán los resultados de los reogramas representativos, obtenidos de las de la caracterización reológica de las concentraciones de 0.5%, 1.5%, y 3%, aunque como ya se mencionó anteriormente se realizaron mediciones de más concentraciones, sin embargo se eligieron estas para que el análisis sea igual en ambos método de extracción., ya que para la pectina purificada solamente se analizaron estas tres concentraciones, porque se dificultaba su preparación ya que eran muy viscosas.

Los resultados experimentales del esfuerzo cortante y de la velocidad de cizalla para cada una de las concentraciones estudiadas, se ha ajustado, a la forma no linealizada del modelo de ley de potencia.

### **4.2.1 Análisis de los Reogramas mediante el modelo de la ley de la potencia.**

Los fluidos pseudoplásticos y reoespesantes muestran una relación no lineal entre  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$  que en ambos casos se representa por el modelo reológico más utilizado y simple de aplicar el de Ostwald-de Waale, también conocido como ley de la Potencia.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Donde,  $n$  = Es una constante empírica denominada ***índice del comportamiento del flujo*** y nos da una idea del grado de desviación del fluido con respecto al newtoniano, es una medida del debilitamiento o adelgazamiento por corte (pérdida de viscosidad), carece de unidades.

**K** = Se conoce comúnmente como **coeficiente de consistencia** con unidades Pa·s<sup>n</sup>.

\* Para n = 1, el modelo representan el comportamiento newtoniano, donde K = η

\* Para n > 1, el modelo sigue un comportamiento reoespesante.

\* Para n < 1, el modelo sirve para comportamiento de tipo pseudoplástico.

Los pseudoplásticos se adelgazan con el esfuerzo; en cambio, los dilatantes se espesan

En las Tablas 5, 6, 7 y 8, se representan los resultados del índice de comportamiento al flujo (**n**) y el índice de consistencia (**K**), para los dos métodos de extracción, estos valores se determinaron mediante una regresión lineal realizada a los reogramas obtenidos, mediante la Ley de la Potencia.

\* Se partió del modelo reológico:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

\* A esta expresión se le aplicaron logaritmos, llegando a:

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma}$$

\* Se graficó

$$\log \tau \text{ vs } \log \dot{\gamma}$$

\* Se obtuvo la pendiente y ordenada al origen de la recta resultante:

Pendiente = n = índice de comportamiento.

Ordenada al origen = b = log k

\* Finalmente  $K = 10^b$

Tabla 5 — Parámetros físicos para las diferentes soluciones de pectina sin purificar, extraída con ácido clorhídrico 0.01M

Temperatura		5° C				10° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-2.2463	0.0057	0.9003	0.9901	-2.6815	0.00208	1.1140	0.9569
	1.0%	-1.8850	0.0130	0.8729	0.9893	-2.0724	0.00846	0.8985	0.9974
	1.5%	-1.6875	0.0205	0.8916	0.9932	-1.6875	0.02054	0.8916	0.9932
	2.0%	-1.2553	0.0556	0.9396	0.9995	-1.5479	0.02832	0.9172	0.9958
	2.5%	-1.1936	0.0640	0.9164	0.9984	-0.6159	0.24216	0.9891	0.9994
	3.0%	-1.0309	0.0931	0.9394	0.9999	-1.1127	0.07714	0.9142	0.9980
	3.5%	-0.8518	0.1407	0.9391	0.9997	-0.9394	0.11497	0.9237	0.9993
	4.0%	-0.6624	0.2176	0.8870	0.9992	-0.7384	0.18264	0.9366	0.9996
Temperatura		25° C				35° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-3.2400	0.0006	1.3709	0.9167	-3.2872	0.0005	1.2907	0.9819
	1.0%	-2.1951	0.0064	0.8672	0.9937	-2.3239	0.0047	0.8941	0.9912
	1.5%	-1.9090	0.0123	0.8561	0.9937	-2.0720	0.0085	0.9040	0.9946
	2.0%	-1.8277	0.0149	0.9714	0.9999	-1.9490	0.0112	0.9774	0.9993
	2.5%	-1.6055	0.0248	0.9783	1.0000	-1.6949	0.0202	0.9626	0.9993
	3.0%	-1.3776	0.0419	0.9752	0.9987	-1.5640	0.0273	0.9802	1.0000
	3.5%	-1.1812	0.0659	0.9743	0.9998	-1.3666	0.0430	0.9514	0.9993
	4.0%	-0.9408	0.1146	0.9370	0.9988	-1.0862	0.0820	0.9363	0.9991

Tabla 6 — Parámetros físicos para las diferentes soluciones de pectina purificada, extraída con ácido clorhídrico 0.01 M.

Temperatura		5° C				10° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-2.8551	0.0014	1.3143	0.9509	-2.8757	0.0013	1.2755	0.9783
	1.5%	-1.5729	0.0267	1.0067	0.9998	-1.6542	0.0222	1.0056	0.9989
	3.0%	-0.7217	0.1898	0.9561	0.9998	-0.7998	0.1586	0.9559	0.9999
Temperatura		25° C				35° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-3.7072	0.0002	1.6453	0.8668	-3.6862	0.0002	1.5892	0.8202
	1.5%	-1.8083	0.0155	0.9754	0.9994	-1.8978	0.0127	0.9702	0.9996
	3.0%	-1.0058	0.0987	0.9610	0.9990	-1.2008	0.0630	0.9613	0.9999

Tabla 7 — Parámetros físicos para las diferentes soluciones de pectina sin purificar, extraída con ácido oxálico al 0.5 %.

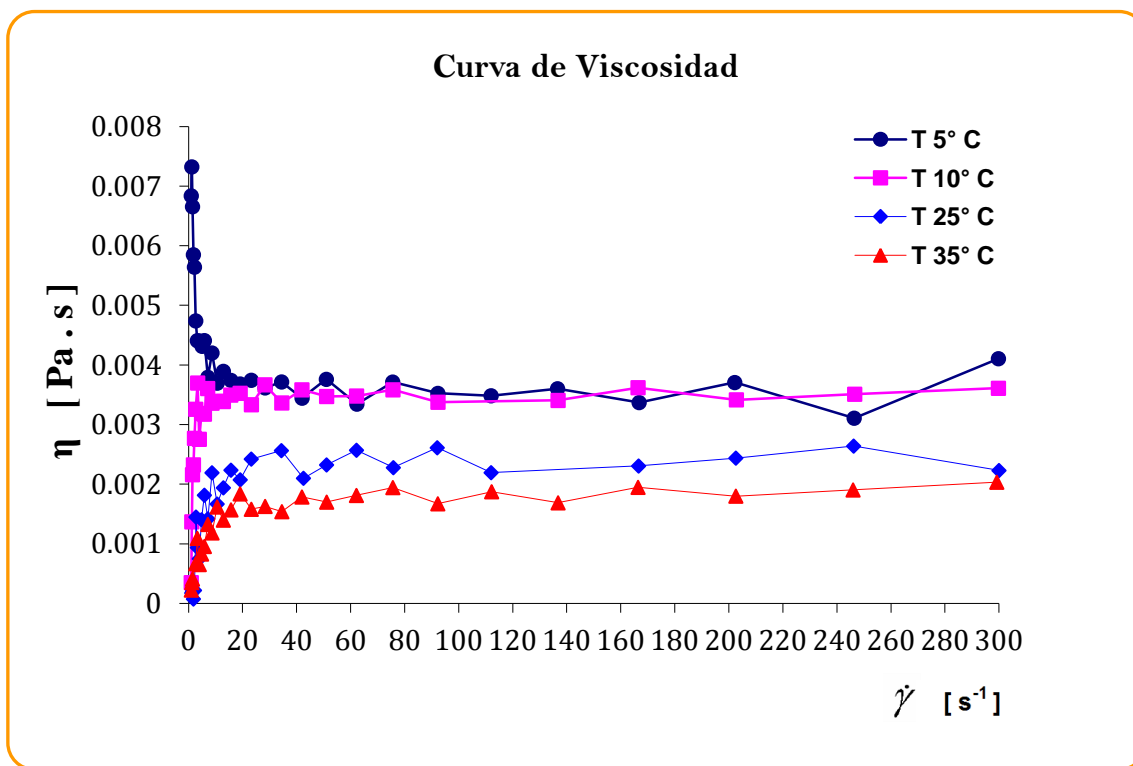
Temperatura		5° C				10° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-2.1604	0.0069	0.9435	0.9975	-2.2474	0.0057	0.9606	0.9988
	1.0%	-1.9062	0.0124	1.0437	0.9983	-1.7940	0.0161	0.9425	0.9981
	1.5%	-1.3528	0.0444	0.9696	0.9996	-1.4897	0.0324	0.9867	0.9996
	2.0%	-0.9941	0.1014	0.9307	0.9994	-1.1142	0.0769	0.9524	0.9994
	2.5%	-0.6860	0.2061	0.9173	0.9977	-0.7968	0.1597	0.9206	0.9988
	3.0%	-0.4412	0.3621	0.8841	0.9967	-0.5571	0.2773	0.9034	0.9978
	3.5%	-0.1397	0.7249	0.8519	0.9944	-0.3216	0.4769	0.8821	0.9964
	4.0%	-0.0624	0.8662	0.8690	0.9937	-0.1352	0.7325	0.8596	0.9949
Temperatura		25° C				35° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-2.4523	0.0035	0.9803	0.9990	-2.3545	0.0044	0.8684	0.9912
	1.0%	-1.8718	0.0134	0.8954	0.9946	-2.1339	0.0073	0.9725	0.9993
	1.5%	-1.6720	0.0213	0.9784	0.9999	-1.8633	0.0137	0.9973	0.9997
	2.0%	-1.3647	0.0432	0.9832	0.9997	-1.4594	0.0347	0.9622	0.9998
	2.5%	-1.0650	0.0861	0.9569	0.9995	-1.1976	0.0634	0.9526	0.9998
	3.0%	-0.4747	0.3352	0.9700	0.9997	-0.8722	0.1342	0.9231	0.9993
	3.5%	-0.5207	0.3015	0.9076	0.9983	-0.6730	0.2123	0.9281	0.9988
	4.0%	-0.4198	0.3804	0.9050	0.9973	-0.4972	0.3183	0.9057	0.9984

Tabla 8 — Parámetros físicos para las diferentes soluciones de pectina purificada, extraída con ácido oxálico al 0.5 %.

Temperatura		5° C				10° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-1.7019	0.0199	0.8925	0.9947	-1.7290	0.0187	0.8672	0.9890
	1.5%	-0.6974	0.2007	0.9215	0.9987	-0.7011	0.1990	0.9267	0.9990
	3.0%	0.7982	6.2835	0.6076	0.9973	0.6990	5.0003	0.6178	0.9951
Temperatura		25° C				35° C			
Parámetros		log K	K	n	r <sup>2</sup>	log K	K	n	r <sup>2</sup>
Solución de Pectina	0.5%	-1.9389	0.0115	0.8648	0.9943	-1.9737	0.0106	0.8290	0.9751
	1.5%	-1.0161	0.0964	0.9623	0.9996	-1.1489	0.0710	0.9537	0.9999
	3.0%	0.1885	1.5435	0.8101	0.9981	0.4229	2.6479	0.6301	0.9861

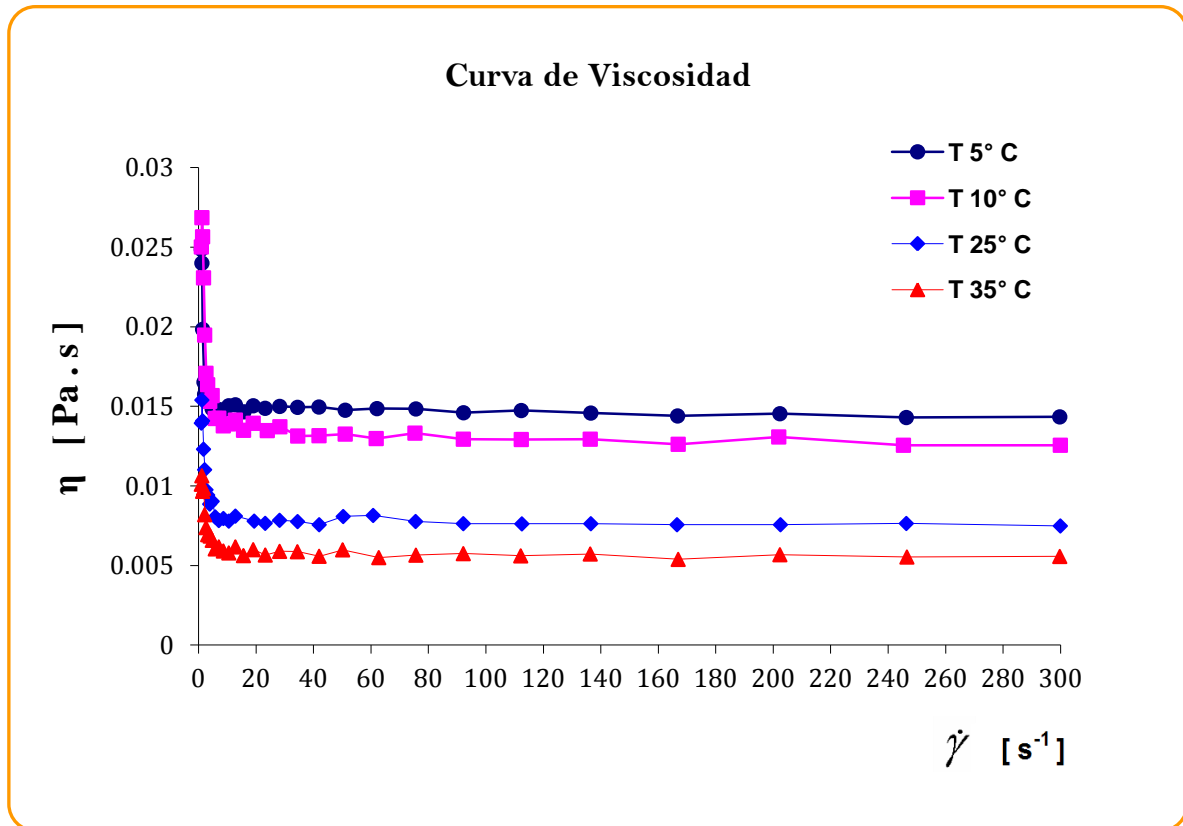
#### 4.2.2 Curvas de Viscosidad de Pectina Sin Purificar, extraída con Ácido Clorhídrico 0.01M

En los siguientes reogramas 4.1, 4.3 y 4.6, se muestra el comportamiento viscosimétrico para todas las concentraciones de pectina sin purificar a las a temperaturas de 5°C, 10°C, 25°C y 35 °C.



Gráfica 4.1 — Reograma de pectina sin purificar al 0.5%, extraída con HCl 0.01M

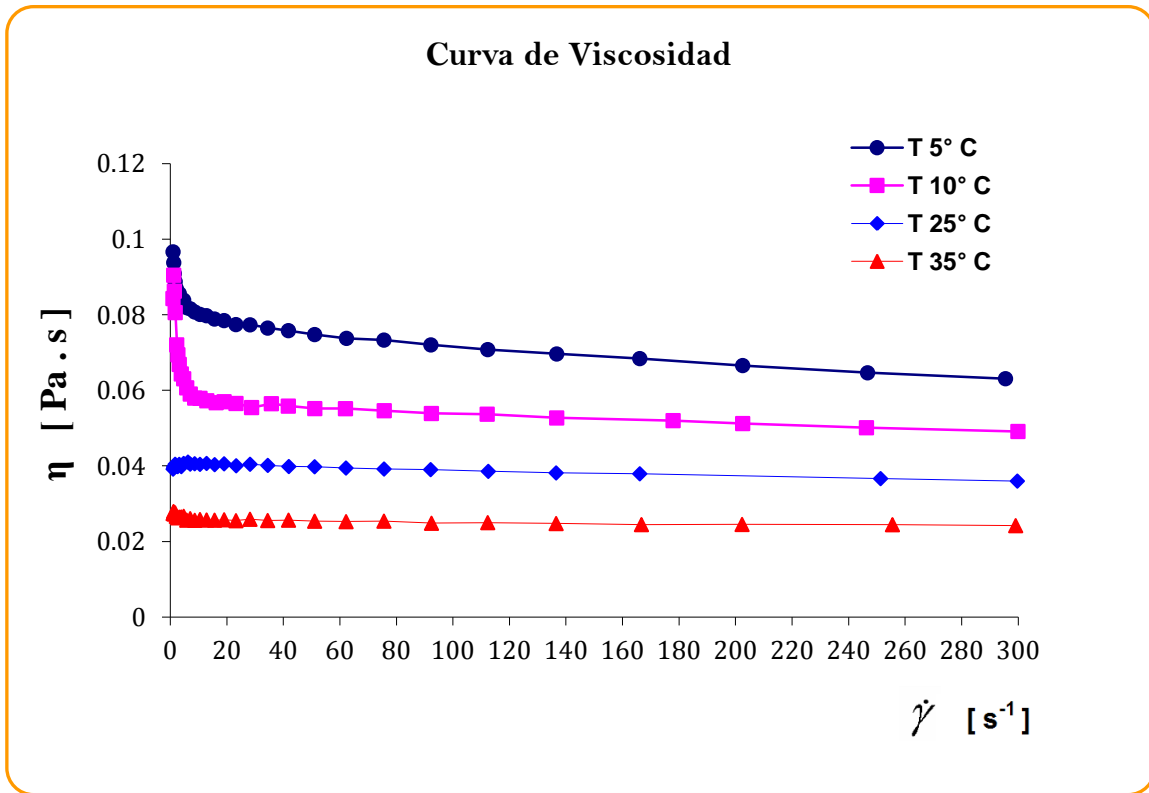
En el gráfico 4.1, se puede apreciar que a una temperatura de 5° C, la viscosidad de la pectina disminuye conforme se aumenta la velocidad de cizalla, esto quiere decir que se tiene un comportamiento pseudoplástico, sin embargo, conforme se va aumentando la temperatura el comportamiento cambia notablemente y se observa un aumento en la viscosidad, comportándose como un fluido reoespesante.



Gráfica 4.3 — Reograma de pectina sin purificar al 1.5 %, extraída con HCl 0.01M

En el caso de los reogramas 4.3 y 4.6, se puede ver que el comportamiento reoespesante desaparece y se aprecian con más nitidez las curvas del comportamiento pseudoplástico que se tuvo al principio y que ahora se mantiene en todas las temperaturas. Esta conducta reopéctica y pseudoplástica, se ratifica con los resultados de la Tabla 5, p. 68, en donde se puede corroborar que el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), es mayor que uno, para un fluido reoespesante cuyos valores para la concentración de 0.5% son 1.1140, (10°C), 1.3709 (25°C), 1.2907 (35°C) y menor que uno, para fluidos pseudoplásticos 0.9003 (5°C).

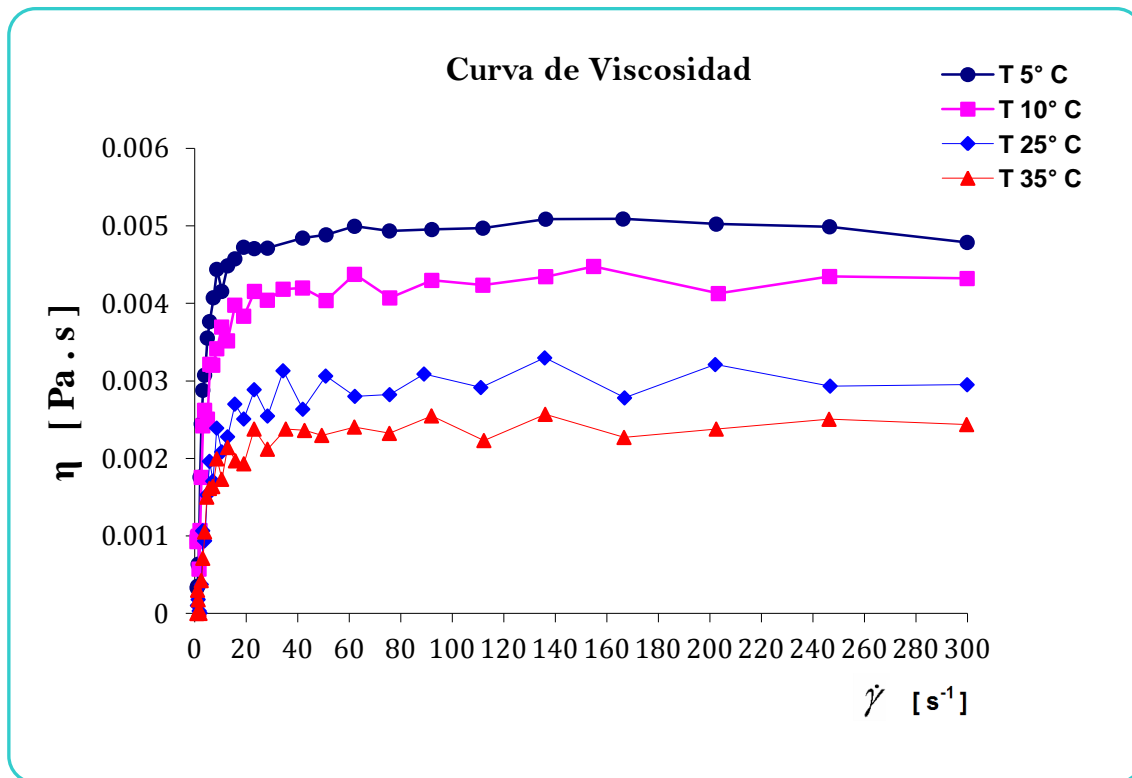




Gráfica 4.6 — Reograma de pecta sin purificar al 3.0%, extraída con HCl 0.01M

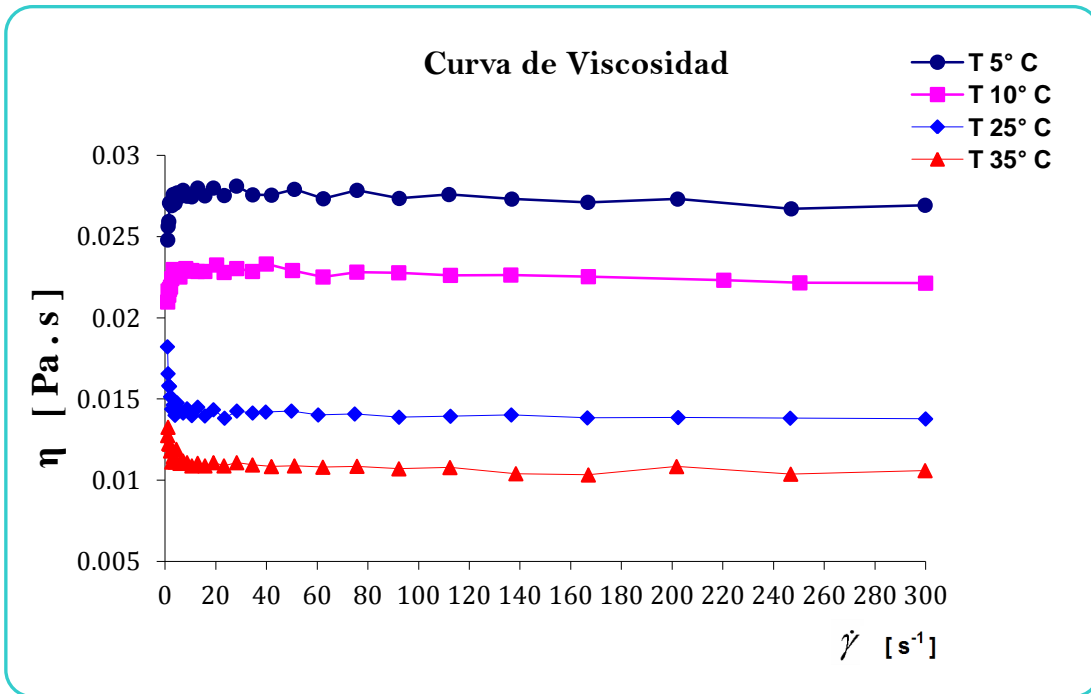
#### 4.2.3 Curva de Viscosidad de Pectina *Purificada*, extraída con Ácido Clorhídrico 0.01M.

Por otro lado en el gráfico 4.9, de la pectina purificada, podemos apreciar de nueva cuenta y en todas las temperaturas un comportamiento reoespesante a una concentración de 0.5 %, este comportamiento continua en el reograma del gráfico 4.10 con las temperaturas de 5°C y 10°C respectivamente.

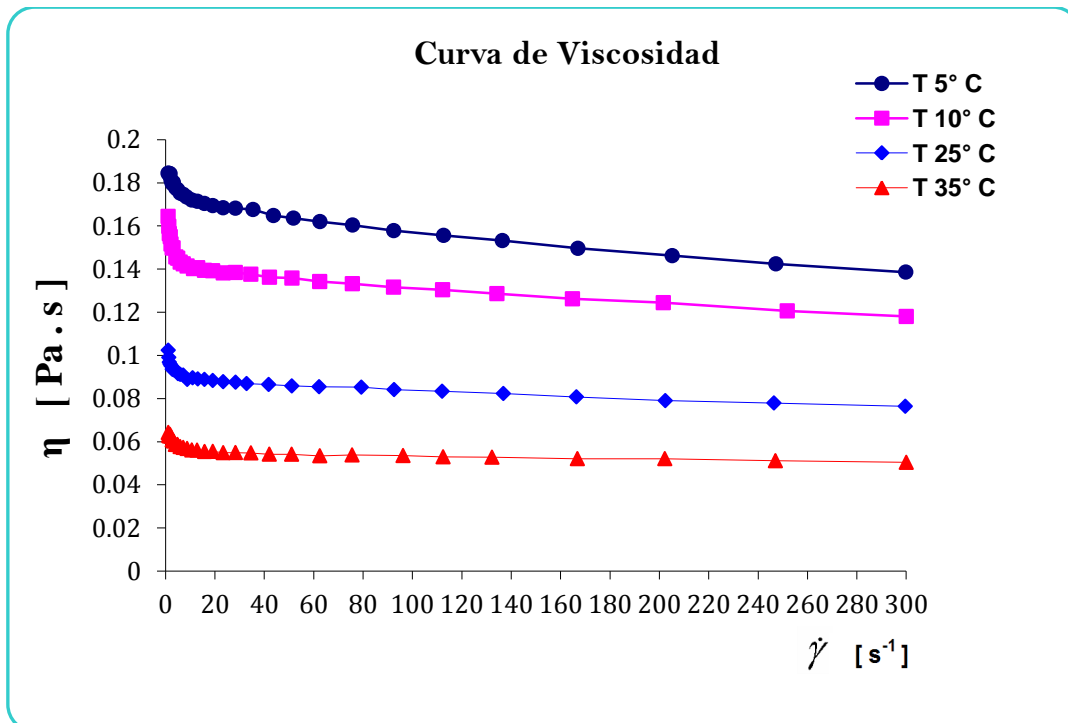


Gráfica 4.9— Reograma de pectina purificada al 0.5 %, extraída con HCl 0.01M

El comportamiento pseudoplástico y reoespesante se sustentan de acuerdo con los datos obtenidos de la tabla 6 p. 68, datos que se determinaron empleando la ley de la potencia, donde tenemos que para una concentración de 0.5 % todos los valores de  $n$  son mayores que uno 1.3143 (5° C), 1.2755 (10° C), 1.6453 (25° C), 1.5892 (35° C), para concentración de 1.5%, gráfico 4.10, se tiene 1.0067 (5° C), 1.0056 (10° C), por lo que se está hablando de un fluido reoespesante. Finalmente para 0.9754 (25° C) y 0.9702 (35° C), y para el gráfico 4.11, p. 74, todos los valores son menores que uno 0.9561 (5° C), 0.9559 (10° C), 0.9610 (25° C), 0.9613 (35° C), por lo que se está hablando de un pseudoplástico.

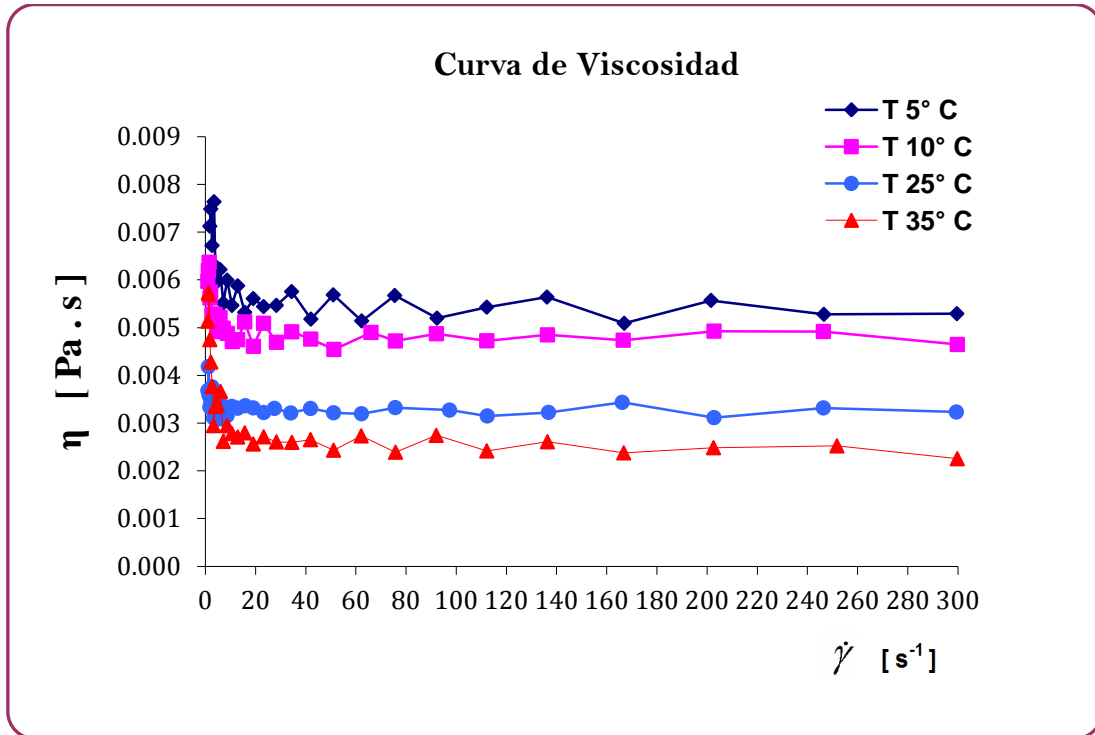


Gráfica 4.10 — Reograma de pectina purificada al 1.5 %, extraída con HCl 0.01M.



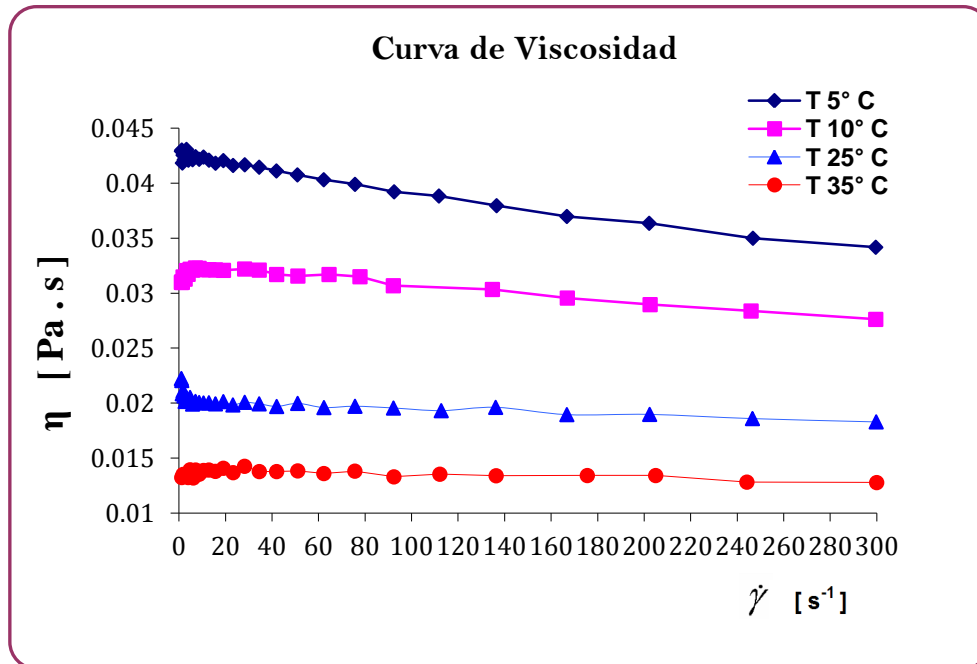
Gráfica 4.11 — Reograma de pectina purificada al 3.0 %, extraída con HCl 0.01M.

4.2.4 Curvas de Viscosidad de la Pectina de Guayaba, *sin purificar* extraída con Ácido Oxálico al 0.5%.

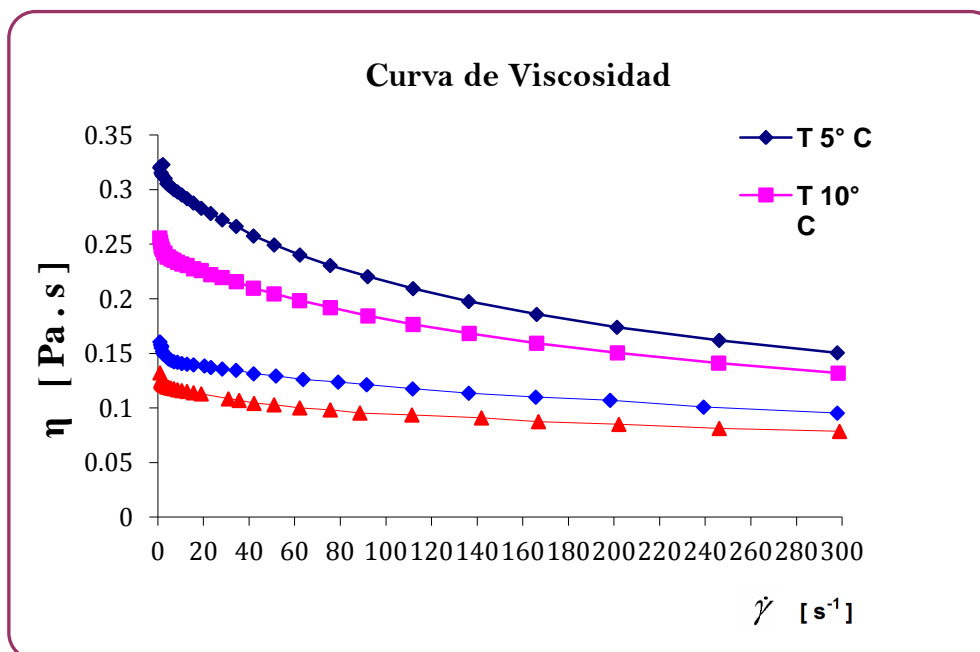


Gráfica 4.12 — Reograma de pectina sin purificar al 0.5%, extraída con ác. oxálico al 0.5 %

Como se puede apreciar en estos reogramas de las gráficas 4.12, 4.14, 4.17, se tiene un comportamiento pseudoplástico, el cual se puede comprobar como ya se mencionó anteriormente con los datos de la tabla 7, p. 69. Donde todos los valores de  $n$  son menores que uno.



Gráfica 4.14 — Reograma de pectina sin purificar al 1.5%, extraída con ác. Oxálico al 0.5 %

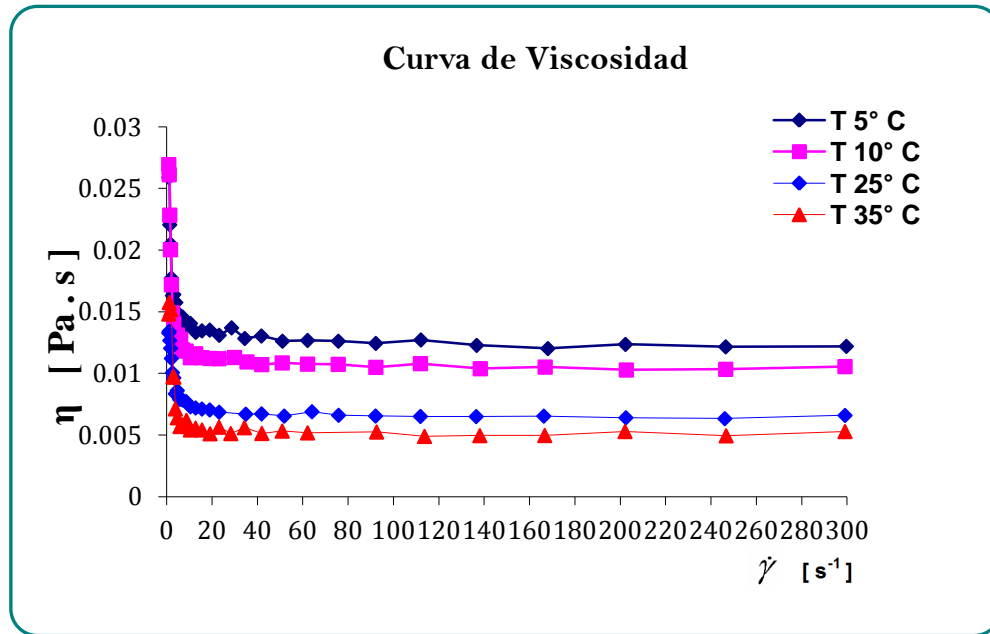


Gráfica 4.17 — Reograma de pectina sin purificar al 3.0%, extraída con ac. Oxálico al 0.5 %

#### 4.2.5. Curva de Viscosidad de la Pectina de Guayaba *purificada*, extraída con Ácido Oxálico al 0.5%.

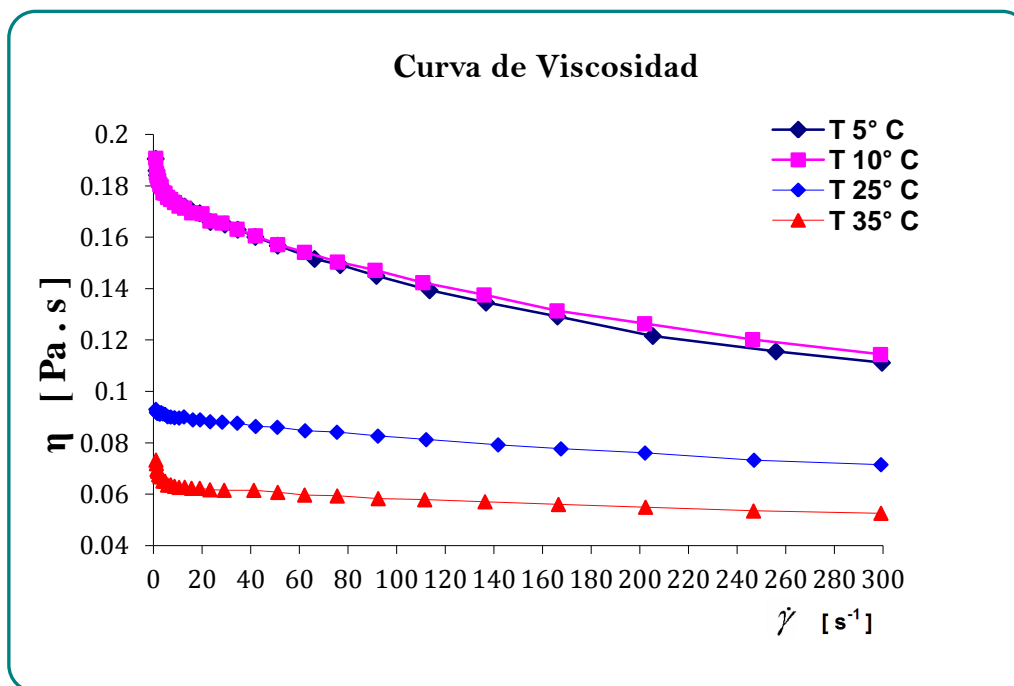
Finalmente en los reogramas de las gráficas 4.20, 4.21 y 4.22, se observan las curvas más definidas que corresponden a un comportamiento pseudoplástico.

Gráfica 4.20 — Reograma de pectina purificada al 0.5%, extraída con ácido oxálico al 0.5%

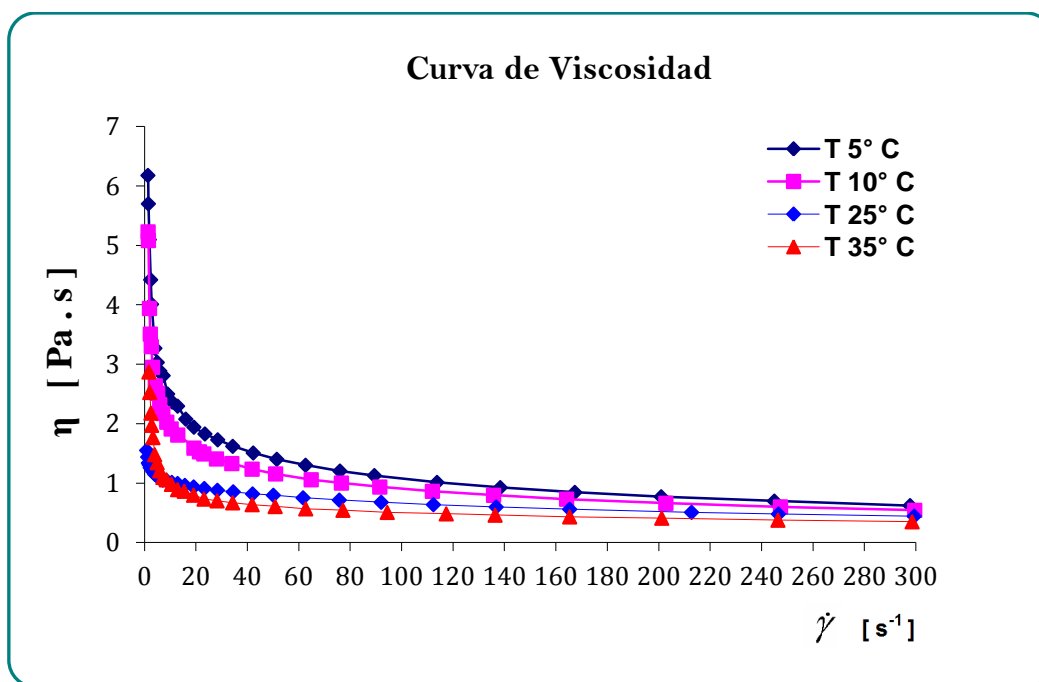


Lo visto anteriormente indica que conforme se va aumentando la concentración de pectina, se aleja más del comportamiento newtoniano.

Gráfica 4.21 — Reograma de pectina purificada al 1.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5%.



Gráfica 4.22 — Reograma de pectina purificada al 3.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5%.



## ***CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES***

---

- \* Los objetivos de este proyecto se cumplieron satisfactoriamente, ya que se logró extraer la pectina de guayaba por los dos métodos establecidos, así como el análisis y la caracterización reológica entre las dos pectinas extraídas.
- \* La aplicación de los dos métodos descritos para la extracción de la pectina son muy sencillos, efectivos y se pueden reproducir fácilmente en el laboratorio. En este caso con resultados muy favorables. Sin embargo hay que mencionar que existen muchos más métodos para la extracción de pectinas, algunos muy simples y otros más complejos que implican aparte del factor tiempo el económico.
- \* Aunque fueron pocos los reogramas que presentaron un fluido reoespesante, de acuerdo a los parámetros reológicos establecidos, se observó en general un comportamiento pseudoplástico para la pectina de guayaba extraída por ambos métodos. Sin embargo se obtuvieron mejores reogramas para las pectinas sin purificar y purificadas, extraídas con ácido oxálico al 0.5 %, además de que el comportamiento se nota más definido al emplear esta técnica.
- \* Es importante destacar que aún falta por hacer en la investigación de la pectina de guayaba. A pesar de que existen publicaciones del estudio de las pectinas extraídas de diversas frutas y vegetales, este trabajo da la pauta para que posteriormente se pueda realizar un estudio más completo de sus propiedades, para lo cual se requiere material y equipos, que no se tienen en el laboratorio. aunque las pectinas más estudiadas son las de los cítricos es necesario saber si las extraídas de otras variedades botánicas poseen la misma calidad, completamente sobre bases científicas y experimentales y así tener otra fuente alterna de obtención.



- \* Este trabajo permitió conocer las condiciones de extracción y del comportamiento reológico de la pectina de guayaba, que son los compuestos más importantes en las frutas ampliamente empleadas para la producción de alimentos como jaleas, mermeladas, ates, conservas etc. y que hacen posible su preparación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

### Bibliografía

1. Aldaco Iñiguez Marco Antonio. *Extracción de la Pectina del Tejocote*; Tesis 1997; Universidad Nacional Autónoma de Chapingo; pp. 6-7.
2. Alvarado, Juan de Dios, *Métodos para Medir Propiedades Físicas en la Industria de Alimentos*, Acibia, S.A. Zaragoza, España, 2001. p.91-93.
3. Ardila Ferreira Salomón. *Pectinas: Aislamiento, Caracterización y Producción*; Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias; Bogotá, Colombia; 2007; pp. 13-28.
4. ÁvilaC.,I., Producción y rentabilidad del cultivo del guayabo en la Región Oriente de Michoacan, Tesis profesional, DICEA, UACH, Chapingo, México. 2000.
5. Baun B. David B, Rosen R Meyer. *Rheology Modifiers Handbook, Practical Use and Application*; William Andrew Publishing; Nerwich, New York 1997. pp. 19-65.
6. Barnes, H.A, Hutton F.J, K. Walters. *Introduction to Rheology*,Elsevier Science.B.V, S, Amsterdam, 1989, cap. 1.
7. BorralBedolla Salvador, *Introducción a la Tecnología de Alimentos*, 2da edición, Limusa, México, 2003. cap. 5.
8. Bun J.R Hermida. *Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios*; Mundi-Prensa Libros; España; 2000; pp. 67-70.
9. Castelló García Esperanza.*Operaciones Básicas: Manual de Aula*; Universidad Politécnica de Valencia Escuela Superior de Ingeniería del Diseño. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Valencia, España; p.50-53.
10. Cauich Caamal Ignacio. *Estructura, Comportamiento y Rentabilidad de la Producción de Guayaba en México*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 2001. pág. 5, 9,11.
11. Gispert M, Cruells., *La Cultura Alimentaria Mexicana: Fuente de Plantas Comestible para el Futuro.*, Monografía JardínBótanicoCordoba., UNAM., 1997; p. 51-57.
12. LabaDennos. *Rheological Properties of Cosmetics and Toiletries*; Marcel Dekker Inc.; New York 2001; cap.2.

13. Mata B., I y Rodríguez m., A.. Cultivo y producción del guayabo. Editorial Trillas, México. 1990. Cap1.
14. Mueller, H.G. *Introducción a la Reología de los alimentos*, Acriba, España, 1973. pp. 14, 22,74, cap. 6.
15. Mulvanoy J. Steven; *Ingeniería de Alimentos, Operaciones Unitarias y Prácticas de Laboratorio*, Limusa, Nueva York 1986. cap. 2,3.
16. Nussinovitch A. *Hydrocolloid Applications*; Black Academic; London 1997; cap. 5.
17. Nuñez Santiago, María del Carmen; et al. *Introducción a la Reología*, IPN, México, 2001.
18. Pennington T., D. y Sarukán, J. *Árboles Tropicales de México*, INIF, México. 1968.
19. Rao Anandha M. *Rheology of Fluid and semisolid Foods*, Aspen, Maryland, 1999. cap.1.
20. Rosenthal J. Andrew. *Textura de los Alimentos (Medida y Percepción)*; Acriba, S.A.; Zaragoza, España; cap. 4.
21. Ruiz Calderón Nicolás Ramón. *Reología y Textura de Materiales Biológicos, Consistencia y Propiedades del Flujo en Salsas Comerciales.*; Tesis 2002; UNAM-FESC.
22. Sánchez Velásquez Ana María. *Extracción y Caracterización de la Pectina de Tejocote*; Tesis 2002; UNAM.; pp. 15-29.
23. Steffe F. James, Ph.D., P.E. *Rheological Methods in Food Process Engineering*; 2da. Edición; Michigan, Estados Unidos 1996. cap. 1, 2,3.
24. Vega Martínez Rigoberto Román. *Variación de las Propiedades Reológicas de la Formulación de una Crema*. Tesis 2007. UNAM.
25. Wong U.S Dominic; *Química de los Alimentos, Mecanismos y Teoría.*; Acriba; Zaragoza España 1989; pp. 147-150.

## Hemerográfica

26. Garza Salvador, Yuste Josep., *Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos*, Año XL-No.342., April 2003.

## Páginas Electrónicas

27. Camejo de Aparicio Clara. *Extracción y Caracterización de Pectina en Toronja de la Región Zuliana*.  
[http://www.Rev.Fac.Agron.\(LUZ\)13:647-652](http://www.Rev.Fac.Agron.(LUZ)13:647-652).  
Fecha de Consulta 17/10/2007.
28. Camejo de Aparicio Clara. *Extracción y Caracterización de Pectina en Limones injertados de la región Zuliana*.  
[http://www.Rev.Fac.Agron.\(LUZ\)13:647-652](http://www.Rev.Fac.Agron.(LUZ)13:647-652).  
Fecha de Consulta 16/10/2008.
29. GENU\* *Pectin; FoodApplications*;  
<http://www.cpkelco.com/pectin/index.html>  
Fecha de Consulta 15/12/2007.
30. Ing. Armenta Cruz José Manuel.  
*Obtención de la pectina a partir de la Cáscara de la Naranja*  
[http://www.Rev.Fac.Agron.\(LUZ\)](http://www.Rev.Fac.Agron.(LUZ)).  
Fecha de Consulta 16/10/2008.
35. [www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx)  
*Producción Nacional de Guayaba*  
Fecha de Consulta: 05/11/2012
36. S. E. Malo, C.W. Campbell  
*La Guayaba*  
<http://miami-dade.ifas.ufl.edu/old/programs/tropicalfruit/Publications/LA%20GUAYABA1.pdf>  
Fecha de Consulta 17/02/2008.
37. Nava Ramírez Sebastián  
*Fundamentos de Reología de Alimentos*  
<http://www.ingenieriaquimica.net/recursos/descarga.php?id=162&accion=descargar>,  
Fecha de Consulta 03/12/2008

38. Reología de Alimentos;  
[http://www.tecvirtual.com/ibq/alimentos/ing\\_alimentos/13reología.htm](http://www.tecvirtual.com/ibq/alimentos/ing_alimentos/13reología.htm);  
Fecha de Consulta 10/08/2008.
39. Propiedades Físicas y Reológicas  
<http://www.ual.es/~jfernand/TA/Tema4/Tema4-PropiedadesFisicasyReologia.pdf>  
Fecha de Consulta 6/12/2008
40. ¿Qué es la Reología?  
[www.unizar.es/dctmf/jblasco/pfc\\_reologia/anexo1.doc](http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/pfc_reologia/anexo1.doc)  
Fecha de Consulta 01/05/2008.
41. Técnicas Reométricas  
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3626/1/tema5RUA.pdf>  
Fecha de Consulta 06/02/2008.
42. [http://www.guayaba.gob.mx/todas\\_noticias.php?id\\_sistema](http://www.guayaba.gob.mx/todas_noticias.php?id_sistema)  
Fecha de consulta: 12/11/2008.
43. Productores de Guayaba.  
[www.2000agro.com.mx](http://www.2000agro.com.mx).  
Fecha de Consulta: 09/11/12

# **ANEXO 1**

## **CUADRO DE LA ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA EXTRACCIÓN**

**Tabla A.1 Analisis Estadístico Descriptivo de los Resultados de las Extracciones**

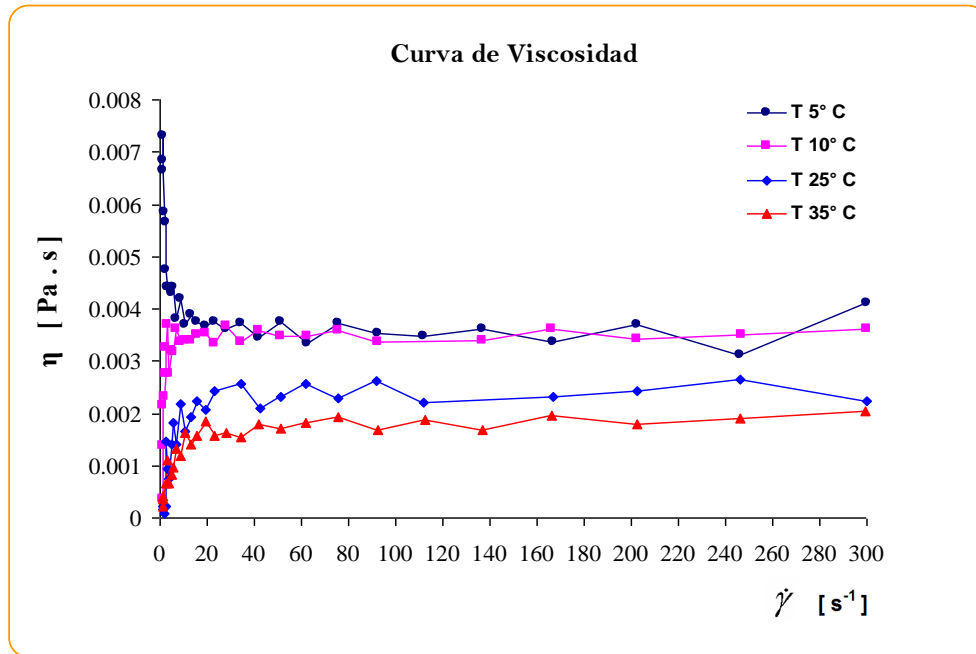
<b>MÉTODO DE EXTRACCIÓN</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Ácido Clorhídrico 0.01 M</b>	<b>Ácido Oxálico al 0.5 %</b>
<b>Número de Extracciones</b>	20	20
<b>Media</b>	3.313845	2.10749
<b>Error típico</b>	0.102304136	0.119047374
<b>Mediana</b>	3.1606	2.34075
<b>Moda</b>	N/A	N/A
<b>Desviación estándar</b>	0.457518004	0.53239604
<b>Varianza de la muestra</b>	0.209322724	0.283445543
<b>Rango</b>	1.5906	1.7271
<b>Mínimo</b>	2.8032	1.024
<b>Máximo</b>	4.3938	2.7511
<b>Suma</b>	66.2769	42.1498
<b>Nivel de confianza(95.0%)</b>	0.214125016	0.249169016

## **ANEXO 2**

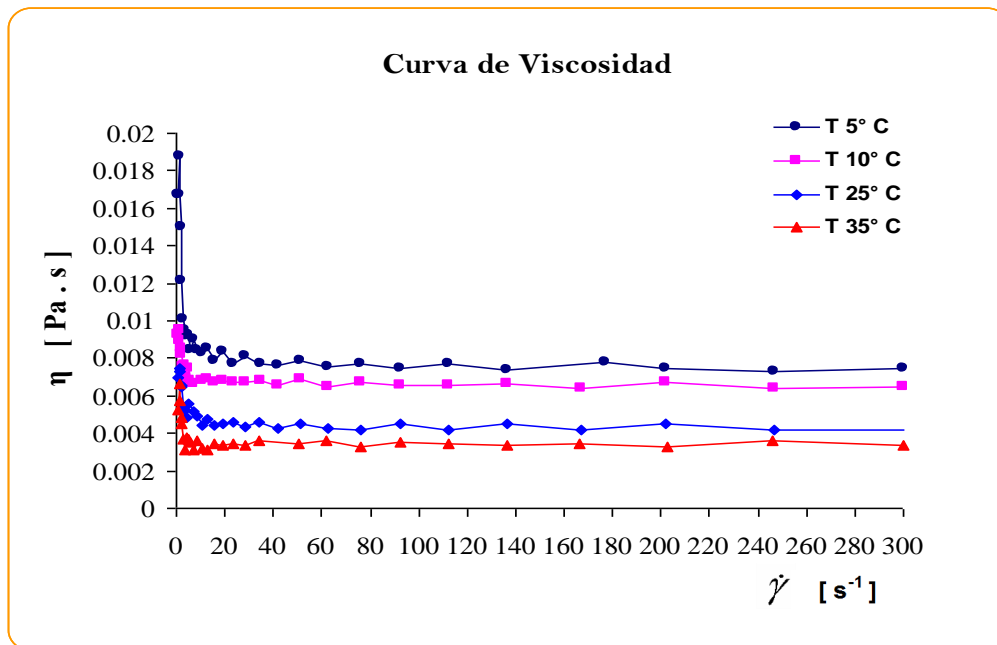
**GRAFICAS DE PECTINA SIN PURIFICAR, EXTRAÍDA CON ÁCIDO  
CLORHÍDRICO 0.01 M, A DIFERENTES CONCENTRACIONES**



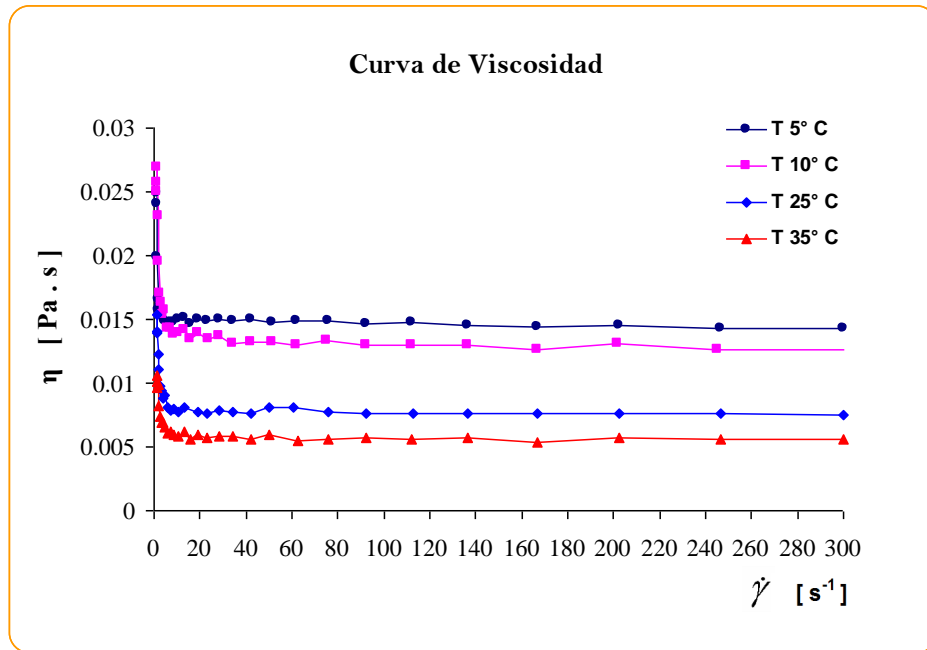
Gráfica 4.1 — Reograma de pectina sin purificar al 0.5 % extraída con HCl 0.01M



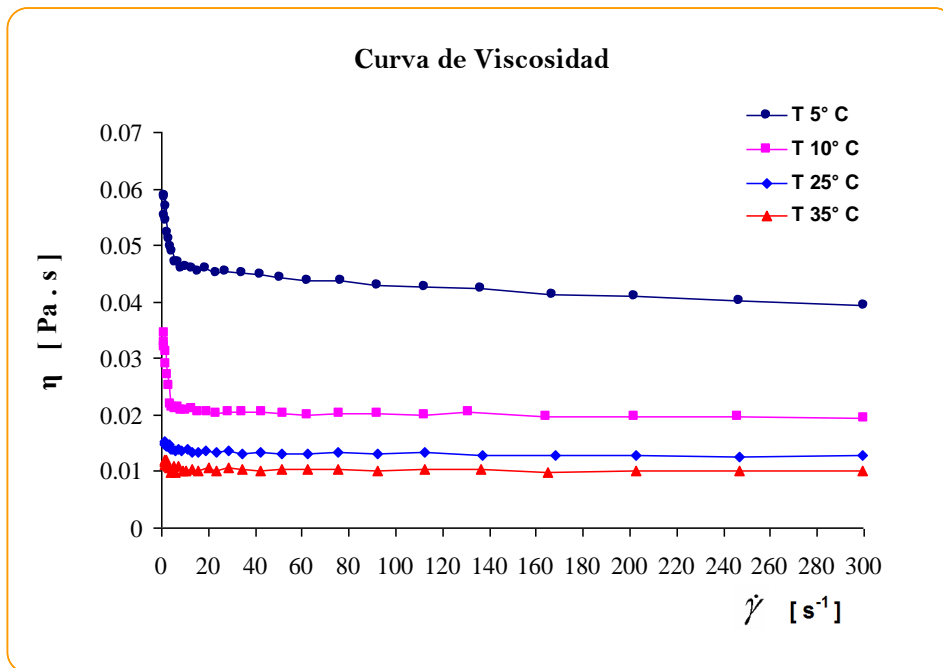
Gráfica 4.2 — Reograma de pectina sin purificar al 1.0 %, extraída con HCl 0.01M



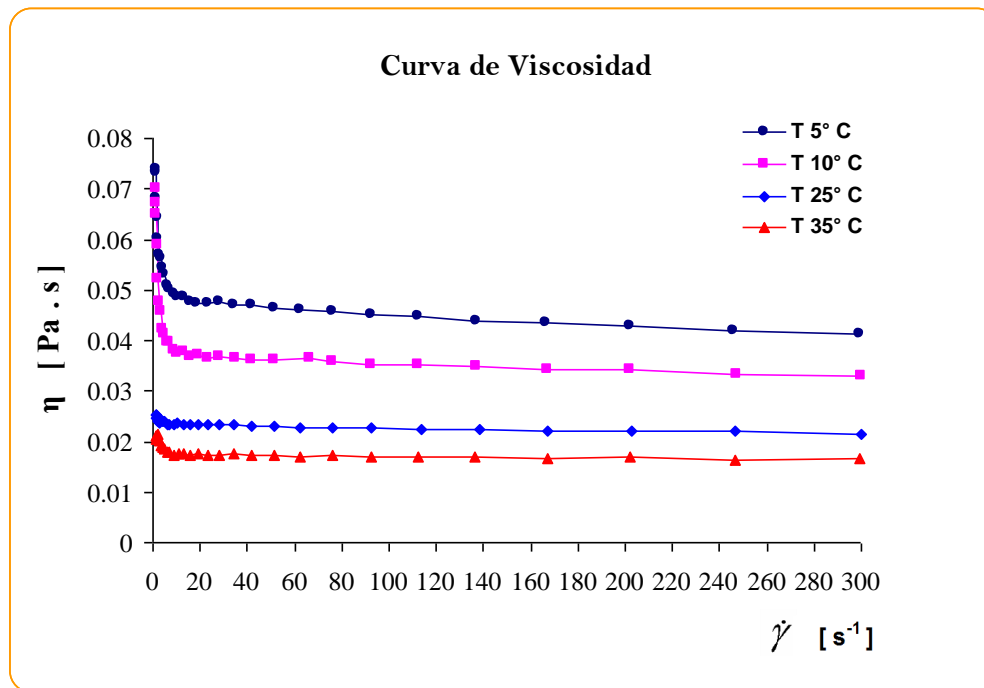
Gráfica 4.3 — Reograma de pectina sin purificar al 1.5 %, extraída con HCl 0.01M



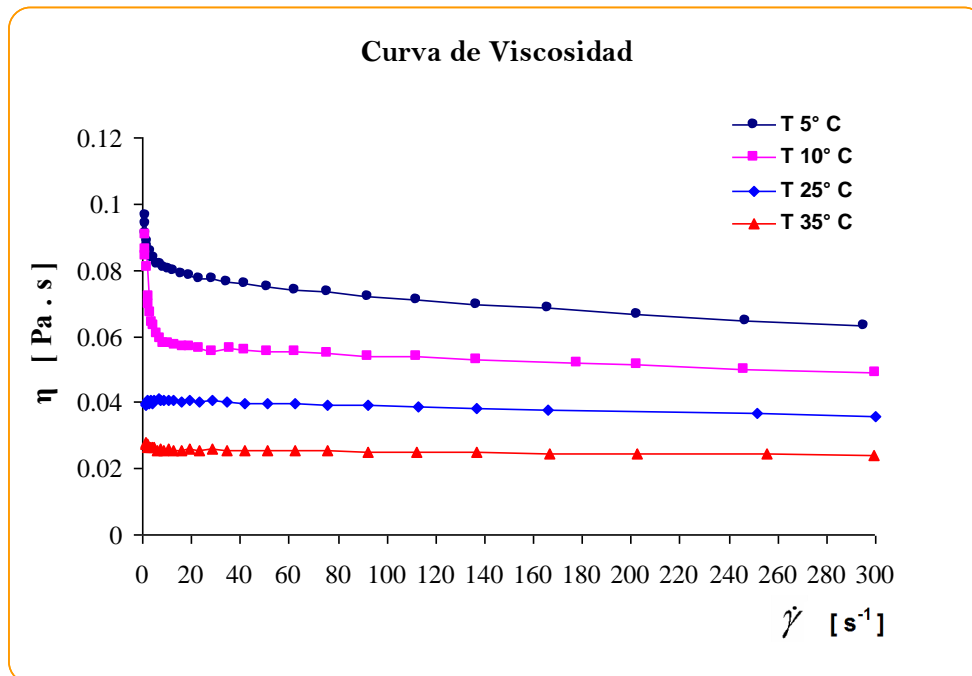
Gráfica 4.4 — Reograma de pectina sin purificar al 2.0 %, extraída con HCl 0.01M



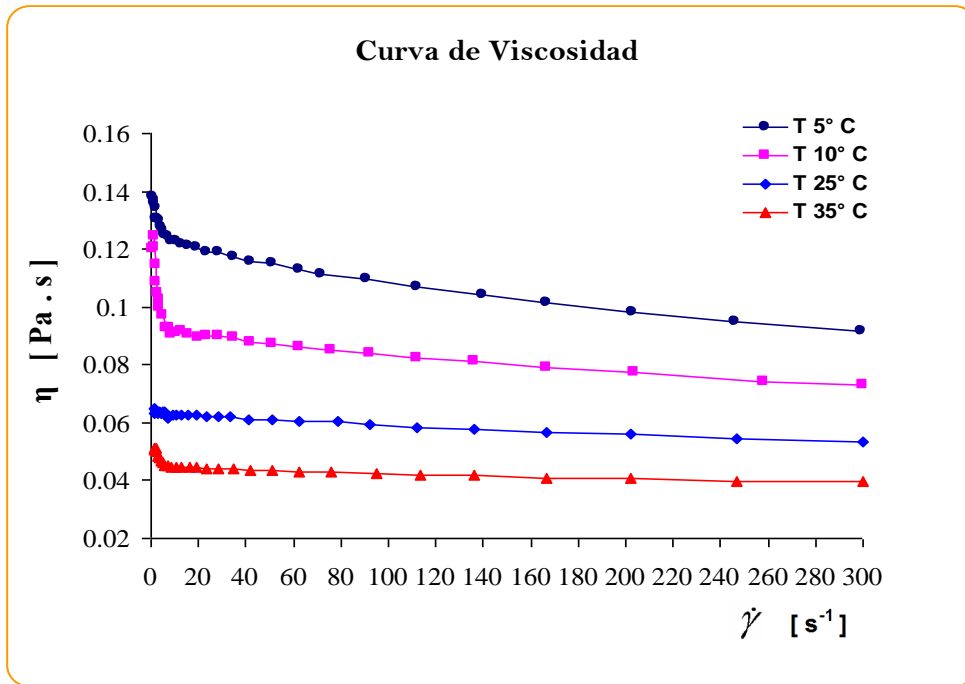
Gráfica 4.5 — Reograma de pectina sin purificar al 2.5 %, extraída con HCl 0.01M



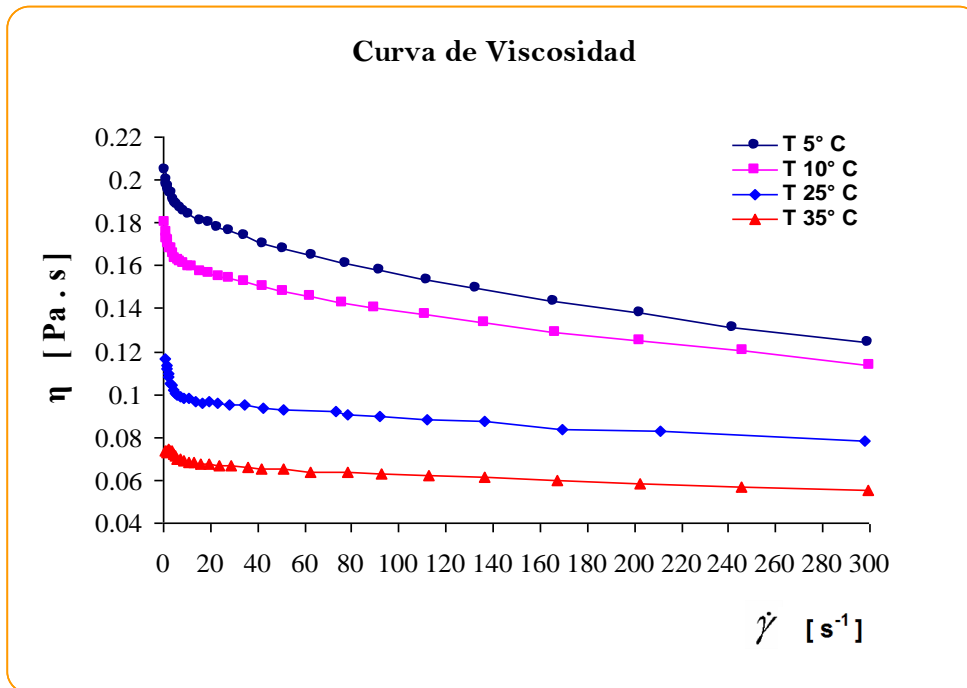
Gráfica 4.6 — Reograma de pectina sin purificar al 3.0 %, extraída con HCl 0.01M



Gráfica 4.7 — Reograma de pectina sin purificar al 3.5 %, extraída con HCl 0.01M



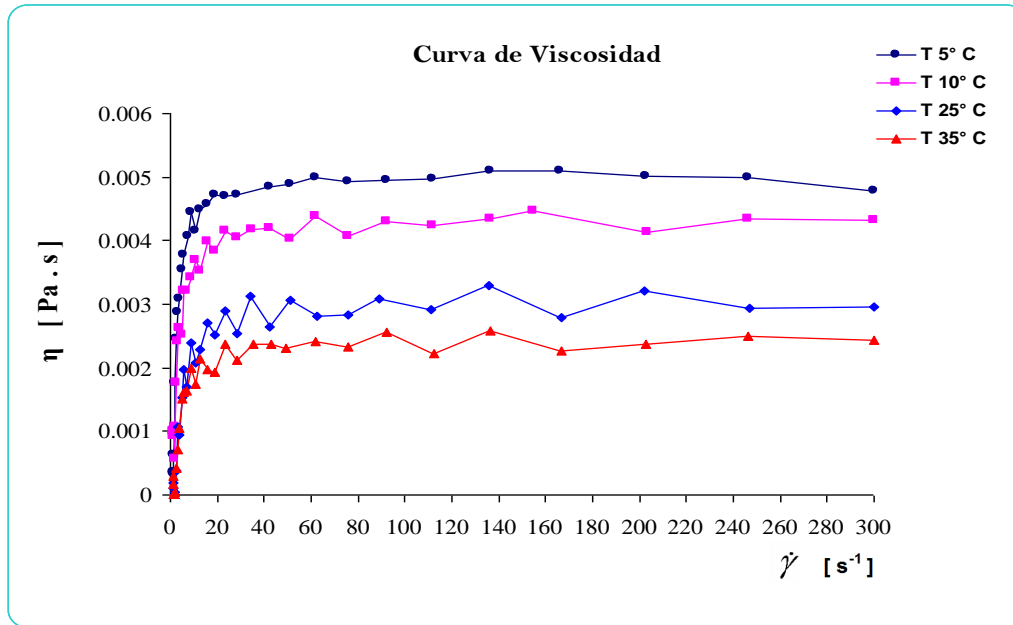
Gráfica 4.8 — Reograma de pectina sin purificar al 4.0%, extraída con HCl 0.01M



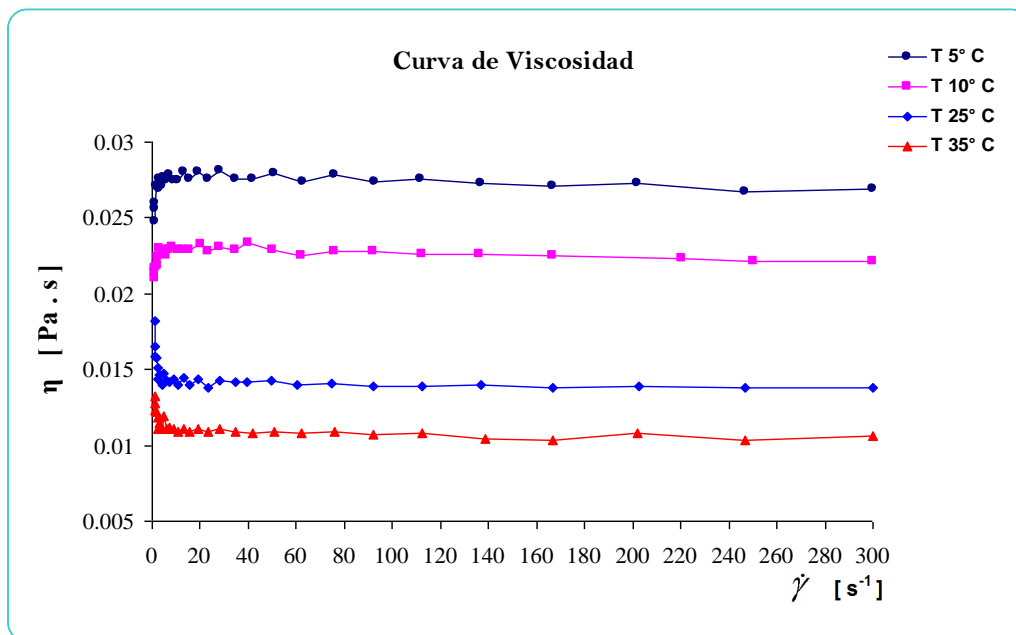
## **ANEXO 3**

**GRAFICAS DE PECTINA PURIFICADA, EXTRAÍDA CON ÁCIDO CLORHÍDRICO 0.01 M, A DIFERENTES CONCENTRACIONES.**

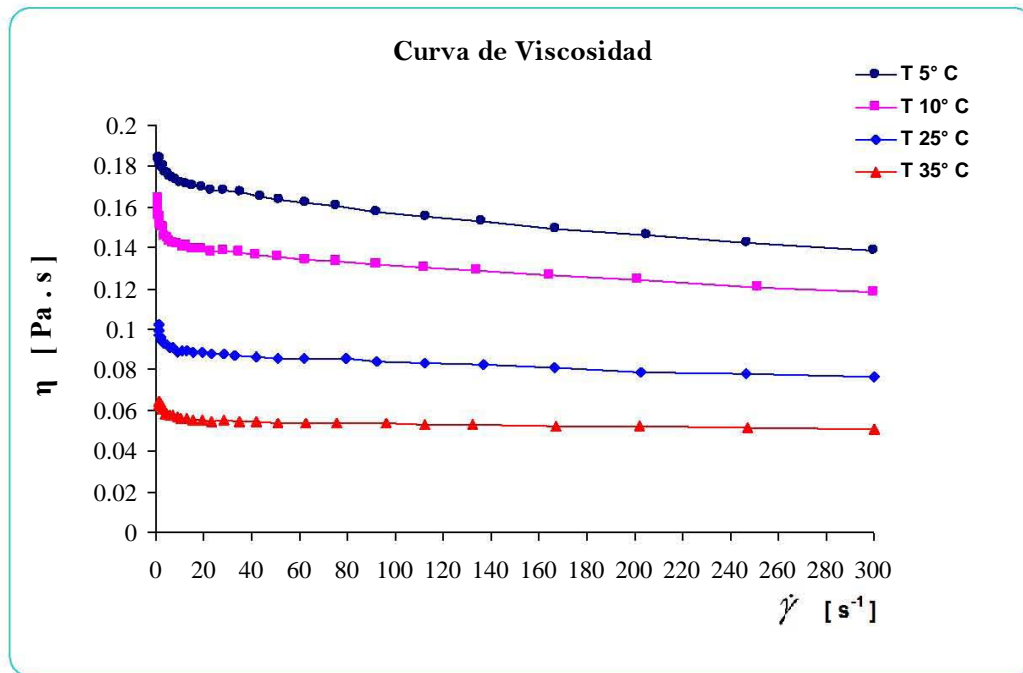
Gráfica 4.9 — Reograma de pectina purificada al 0.5 %, extraída con HCl 0.01M



Gráfica 4.10 — Reograma de pectina purificada al 1.5 %, extraída con HCl 0.01 M



Gráfica 4.11 — Reograma de pectina purificada al 3.0 %, extraída con HCl 0.01 M

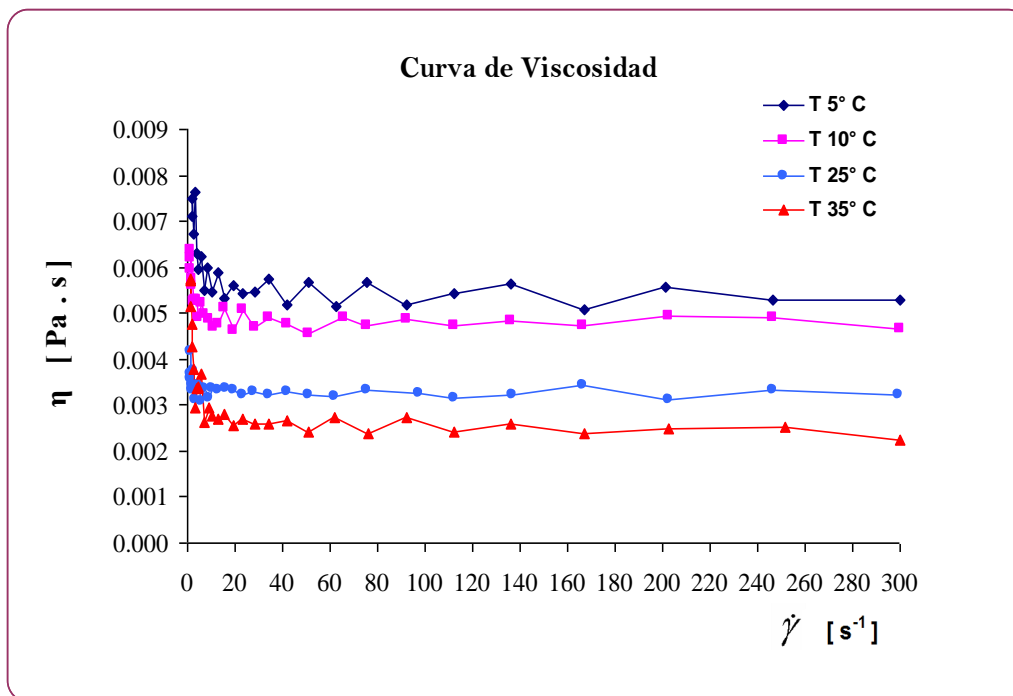


## **ANEXO 4**

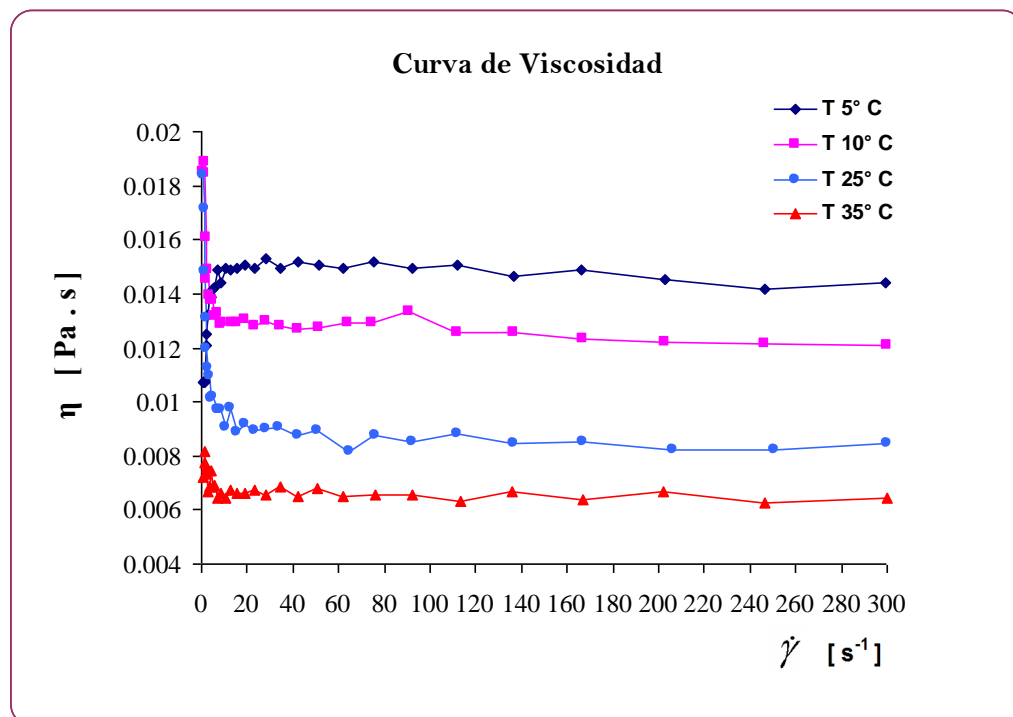
**GRAFICAS DE PECTINA SIN PURIFICAR, EXTRAÍDA CON ÁCIDO  
OXÁLICO AL 0.5 %, A DIFERENTES CONCENTRACIONES.**



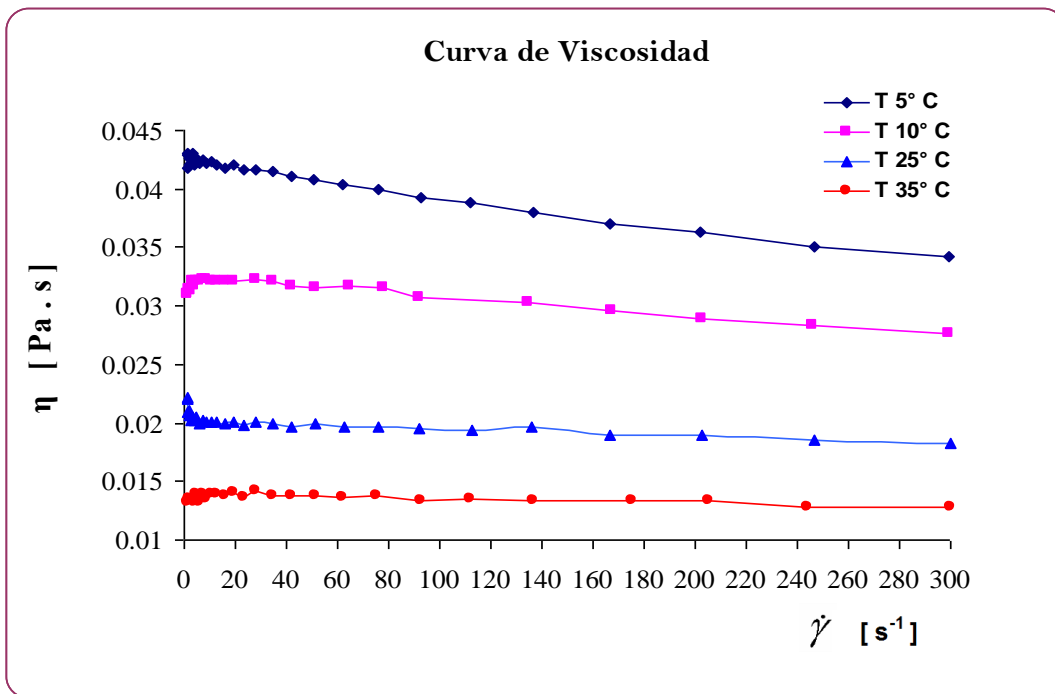
Gráfica 4.12 — Reograma de pectina sin purificar al 0.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



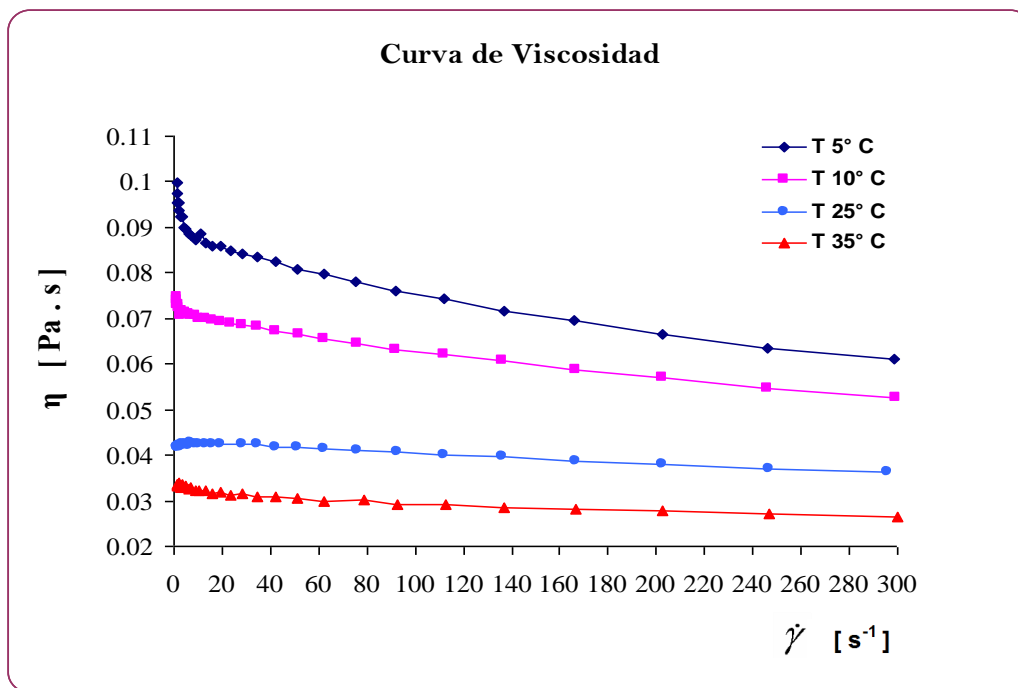
Gráfica 4.13 — Reograma de pectina sin purificar al 1.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



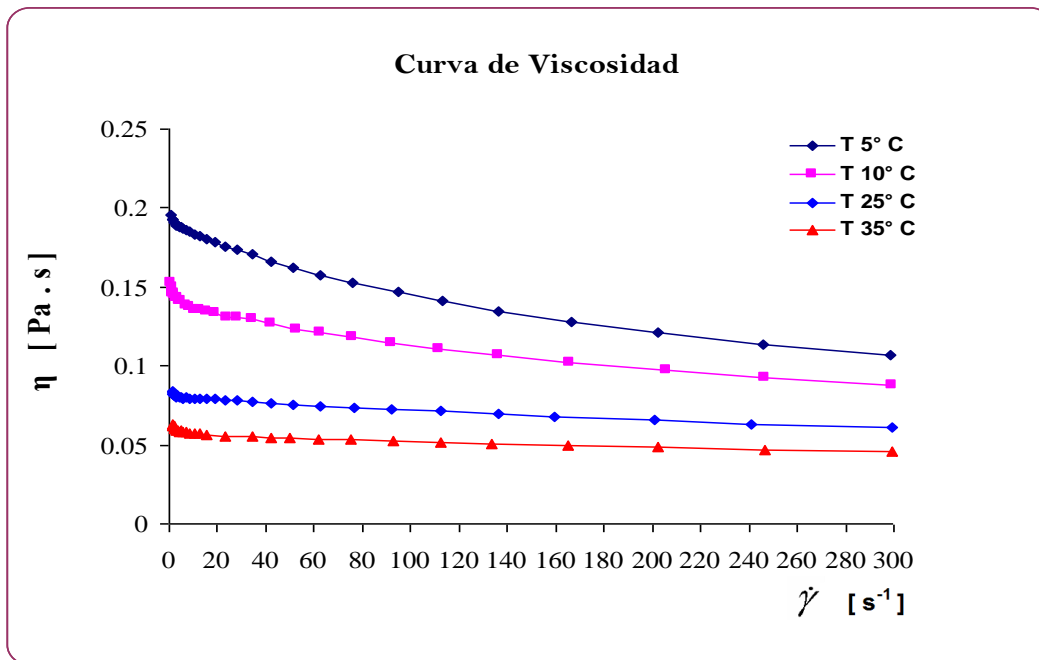
Gráfica 4.14 — Reograma de pectina sin purificar al 1.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



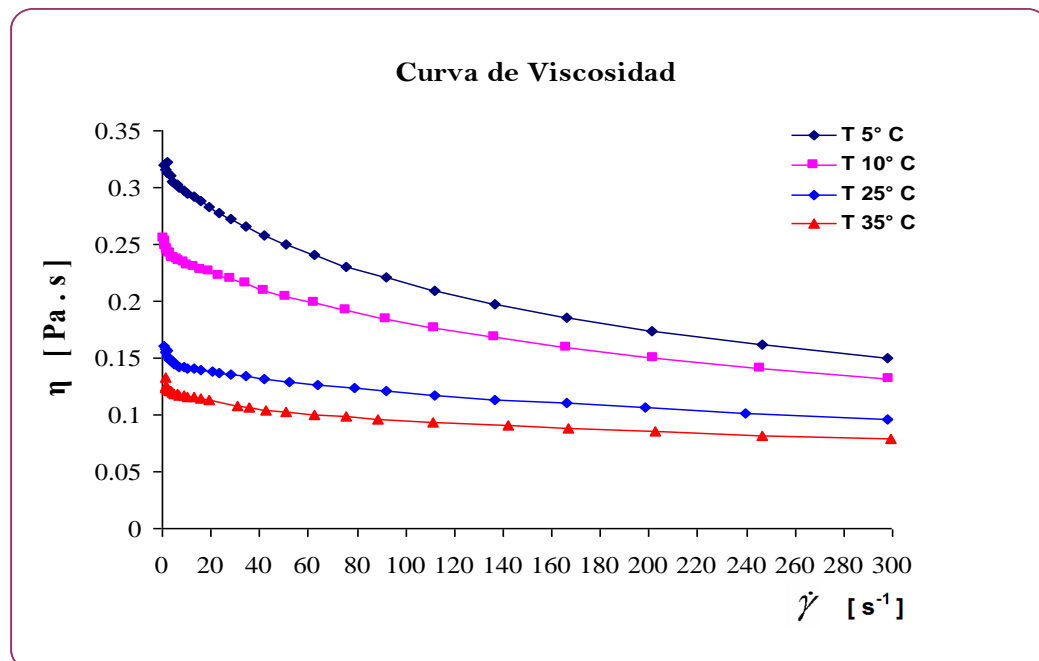
Gráfica 4.15 — Reograma de pectina sin purificar al 2.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5%



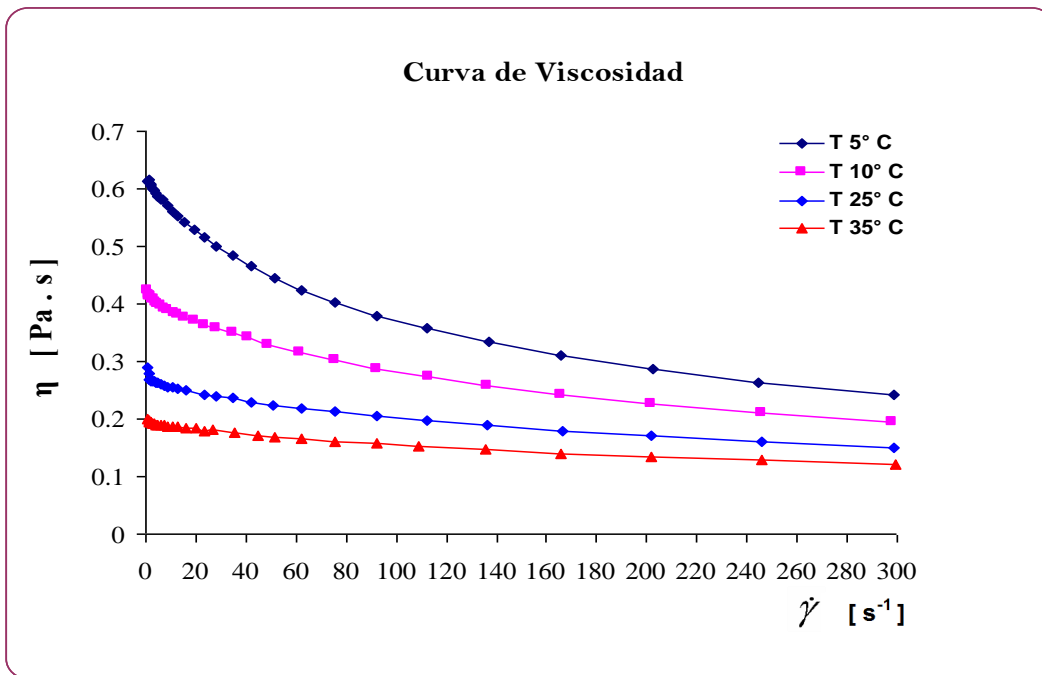
Gráfica 4.16 — Reograma de pectina sin purificar al 2.5%, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



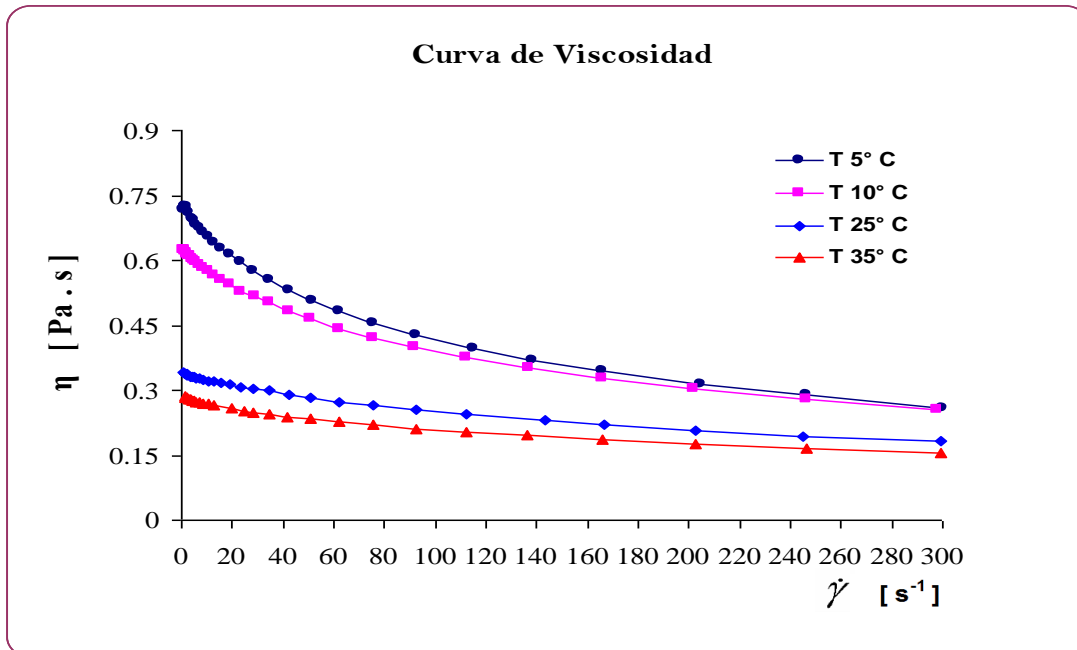
Gráfica 4.17 — Reograma de pectina sin purificar al 3.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



Gráfica 4.18 — Reograma de pectina sin purificar al 3.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



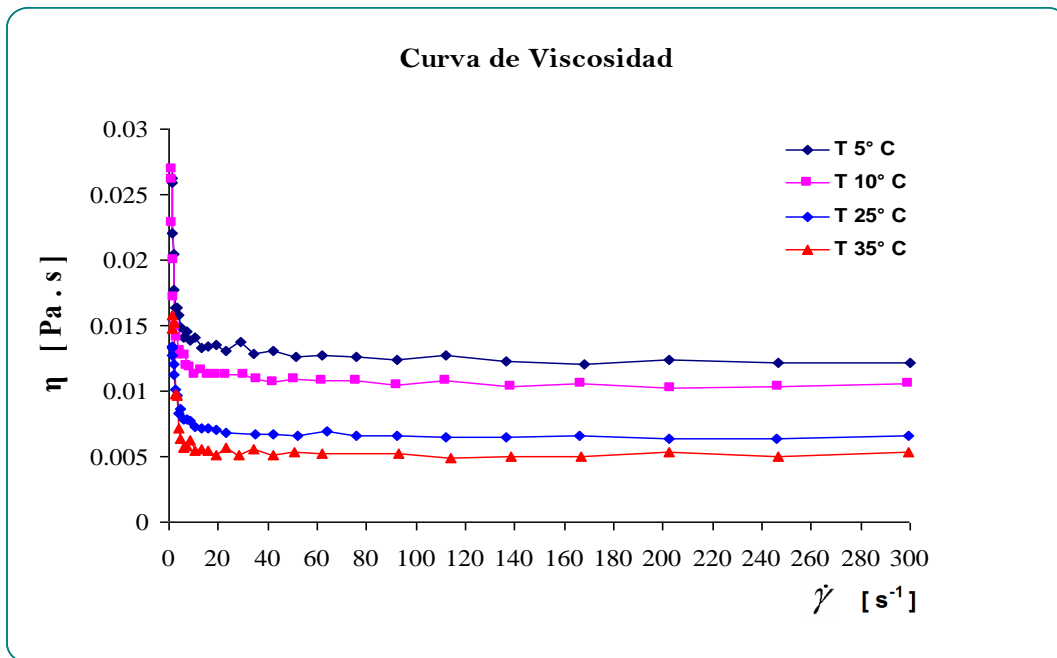
Gráfica 4.19 — Reograma de pectina sin purificar al 4.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



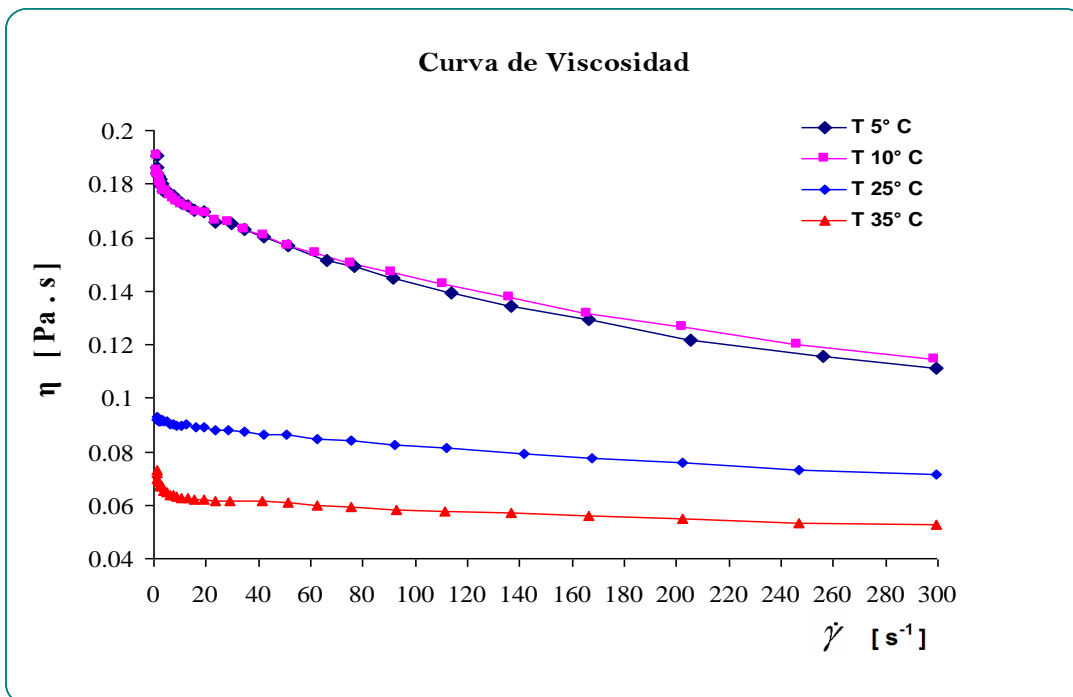
## **ANEXO 5**

**GRAFICAS DE PECTINA PURIFICADA, EXTRAÍDA CON ÁCIDO  
OXÁLICO AL 0.5 %, A DIFERENTES CONCENTRACIONES.**

Gráfica 4.20 — Reograma de pectina purificada al 0.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



Gráfica 4.21 — Reograma de pectina purificada al 1.5 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %



Gráfica 4.22 — Reograma de pectina purificada al 3.0 %, extraída con ácido oxálico al 0.5 %

