

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**



**Propiedades fisicoquímicas y reológicas de pectinas de manzana  
(*Malus domestica*) y su potencial aplicación en un sistema alimenticio  
tipo salsa**

**Por:**

**JESÚS HERNÁNDEZ CRUZ**

**Tesis**

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de  
INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Mayo 2015**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

Propiedades fisicoquímicas y reológicas de pectinas de manzana (*Malus domestica*) y su potencial aplicación en un sistema alimenticio tipo salsa

Por

JESÚS HERNÁNDEZ CRUZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

**INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS.**

**JURADO CALIFICADOR.**

**Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez**  
**Presidente**

**Dr. Mario Alberto Cruz Hernández**  
**Vocal**

**M.C. Mildred Inna Marcela Flores**  
**Verástegui**  
**Vocal**

**M.C. Sarahí del Carmen Rangel**  
**Ortega**  
**Vocal**



**Dr. José Duñez Alanís**  
**Coord. División de Ciencia Animal**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Propiedades fisicoquímicas y reológicas de pectinas de manzana (*Malus domestica*) y su potencial aplicación en un sistema alimenticio tipo salsa

Por

**JESÚS HERNÁNDEZ CRUZ**

**TESIS**

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

**INGENIERO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

**Dra. Dolores Gabriela Martínez Vázquez**  
Asesor principal Interno

**Dr. Paul Baruk Zamudio Flores**  
Asesor principal externo

**M.P. Francisco Hernández Centeno**  
Coasesor

**M.C. Juan Manuel Tirado Gallegos**  
Coasesor

**M.C. Emilio Ochoa Reyes**  
Coasesor

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Mayo 2015**

Este trabajo se realizó en el laboratorio de Carbohidratos, Empaques y Alimentos Funcionales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (Unidad Cuauhtémoc), bajo la dirección del Dr. Paul Baruk Zamudio Flores. Esta tesis es producto del proyecto **“Caracterización (química, reológica y de estabilidad térmica), identificación de usos tecnológicos potenciales y aplicación en un alimento modelo de un producto de alto valor comercial obtenido a partir de manzana chihuahuense y sus desechos industriales”**, financiado por el **Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Chihuahua, con clave (CHIH-2012-CO3-194579)**.

## Agradecimientos

Al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Chihuahua, por financiar el presente trabajo, el cual forma parte del proyecto titulado: **“Caracterización (química, reológica y de estabilidad térmica) de pectina de manzana, identificación de usos tecnológicos potenciales y aplicación en un alimento modelo de un producto de alto valor comercial obtenido a partir de manzana chihuahuense y sus desechos industriales”**, con clave **CHIH-2012-CO3-194579**.

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. por el apoyo mensual que me otorgaron para la realización de este trabajo de tesis.

Al M.C. **Emilio Ochoa Reyes** técnico de laboratorio de Fitoquímicos, Dr. **Paul Baruk Zamudio Flores**, M.C. **Juan Manuel Tirado Gallegos** estudiante de doctorado y al Ing. **Arturo Ramos Martínez**, técnico de laboratorio de Carbohidratos, Empaques y Alimentos Funcionales (CEAF) del CIAD-Unidad Cuauhtémoc, por su valioso y dedicado apoyo técnico, además de su colaboración durante el tiempo de desarrollo de esta investigación.

Doy gracias a mi *alma mater*, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y todas esas personas que me rodearon; en especial a mi Hermana Oliva Hernández Cruz Por su sacrificio en mis logros, a mis compañeros de la carrera de ingeniero en ciencia y tecnología de alimentos con los que pasé bellos momentos en mi estancia en la ciudad de Saltillo, Coahuila.

A la familia Méndez Betancourt, Señora María Esther Betancourt (chacha) y al Señor Rubén Méndez conocido como don Agustín y sus hijos Yadira Yesenia NINA, Rolando de Jesús, Rubén y esposa e hijos, que me recibieron en su hogar y formaron parte de mis logros hasta terminar la universidad, les estaré eternamente agradecido por sus atenciones conmigo.

A todos los maestros y técnicos laboratoristas que contribuyeron en mi formación durante mi estancia en la universidad les estaré eternamente agradecido.

Al MVZ Ermitaño Ríos Díaz quien es y será un amigo muy especial en mi vida por todo el tiempo que convivimos

## Dedicatorias

A DIOS por permitirme seguir en este mundo a pesar de las dificultades que me ha tocado enfrentar y son las que me han enseñado a formarme como persona, humildemente le dedico este trabajo ya que él me dio la fe y esperanza de concluir este proyecto en mi vida, caminaré siempre con buena voluntad y dando siempre lo mejor que hay en mí eternamente gracias DIOS por todo lo que haces por mí.

A ti mamá ALEJANDRA CRUZ LOPEZ (†) que incondicionalmente me amaste y que estoy convencido de ese gran amor que en mí siempre tendrás aunque no estés presente, y junto con DIOS, en mi corazón siempre vivirás y en mi mente eternamente vas a estar, jamás olvidaré tus consejos.

A ti papá gracias por ser parte de mi vida y los valores que me enseñaste a pesar de las dificultades que te hice pasar durante la etapa de mi crecimiento.

A todos mis sobrinos en general les agradezco los momentos de felicidad que me hacen pasar cuando tengo la dicha de estar con ustedes, serán siempre especiales para mí.

A todos mis hermanos Eusebio, Gabriel, Rodolfo, Oliva, Alejandrita (†), Hilda Millán, Carlos y Elidía Yesenia que son importantes en mi vida y que siempre me dieron palabras de aliento para poder terminar este trabajo.

A mis tíos aunque fueron muy breves los momentos que alguna vez conviví con ustedes siempre hubo esa buena vibra y ese cariño que me demostraron me hicieron sentir que todo esto no es en vano.

A mis abuelitos que cuidaron de mi alguna vez, gracias por su paciencia y todo ese amor que me dieron, pediré a DIOS siempre por ustedes.

Agradezco especialmente a las siguientes distinguidas personas:

Al Dr. José de Jesús Ornelas Paz responsable del proyecto

Al Dr. Paul Baruk Zamudio Flores por aceptarme como su tesista y sobre todo por su comprensión hacia mi persona y su paciencia en el transcurso de este trabajo.

Al MC. Emilio Ochoa Reyes y MC. Juan Manuel Tirado Gallegos por su paciencia conmigo y su sinceridad como personas, les estaré eternamente agradecido por darme esta oportunidad de concluir este proyecto en mi vida.

Al Dr. Claudio Ríos por su incondicional amistad, el apoyo moral y económico que me brindó durante mi estancia en este centro de investigación.

Y a todas las personas que laboran en este centro de investigación: Administrativos, estudiantes de doctorado, maestría, compañeros tesistas, compañeros que se encuentran realizando su servicio social y trabajadores por su compañía en mi estancia en el centro de investigación.

## INDICE GENERAL

<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1. LA MANZANA .....	3
2.1.1. Generalidades .....	3
2.1.2. Producción y consumo .....	6
2.1.3. Variedades .....	9
2.1.4. El fruto .....	11
2.1.5. Aspectos cualitativos y valor nutricional .....	13
2.1.6. Datos estadísticos .....	15
2.1.7. Principales componentes químicos y estructurales .....	15
2.2. ASPECTOS GENERALES DE LAS PECTINAS .....	18
2.2.1. Principales fuentes de obtención .....	21
2.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN .....	21
2.3.1. Métodos físicos .....	22
2.3.2. Métodos químicos.....	22
2.3.3. Métodos enzimáticos .....	23
2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE PECTINAS .....	24
2.4.1. Caracterización física de pectinas .....	24
2.4.2. Caracterización química de pectinas .....	25
2.5. APLICACIONES DE LAS PECTINAS .....	26
2.5.1. Aplicación de las pectinas en la industria alimentaria .....	26
2.5.2. Aplicación biotecnológica de las pectinas.....	28
2.6. REOLOGÍA .....	29
2.6.1. Definición y aplicación .....	29

2.6.2. Métodos reológicos.....	32
<b>III. HIPÓTESIS .....</b>	<b>34</b>
<b>IV. OBJETIVOS .....</b>	<b>35</b>
3.1. Objetivo general .....	35
3.2. Objetivos específicos .....	35
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
4.1. Materiales.....	36
4.2. Métodos .....	39
4.2.1. Obtención de las pectinas .....	39
4.2.2. Caracterización fisicoquímica .....	40
4.2.3. Evaluación reológica de las pectinas.....	42
4.2.4. Elaboración de la salsa.....	43
4.2.5. Evaluación reológica de la salsa control y con pectinas .....	46
4.3. Análisis estadístico .....	47
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>48</b>
5.1. Propiedades fisicoquímicas de las pectinas.....	48
5.1.1. Evaluación del color triestímulo .....	48
5.1.2. Grado de metil-esterificación .....	50
5.1.3. Determinación del peso molecular.....	52
5.2. Propiedades reológicas.....	53
5.2.1. Curvas de flujo.....	53
5.2.2. Áreas bajo las curvas y porcentaje de histéresis.....	63
5.2.3. Evaluación reológica de la salsa con pectinas .....	71
<b>VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>VIII. IDENTIFICACIÓN DE APLICACIONES TECNOLÓGICAS POTENCIALES</b>	<b>76</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la manzana de acuerdo con Moritz Balthasar Borkhausen (1803). .....	5
Cuadro 2. Superficie sembrada/cosechada, producción y rendimiento del fruto de manzana en la modalidad de riego y temporal durante los ciclos (cíclicos y perennes) del año 2012 por Distrito en el estado de Chihuahua.....	7
Cuadro 3. Superficie sembrada/cosechada, producción y rendimiento del fruto de manzana en la modalidad de riego y temporal durante los ciclos (cíclicos y perennes) del año 2012 en el Distrito de Cuauhtémoc, Chihuahua.....	8
Cuadro 4. Valor nutricional de la manzana en 100 g de sustancia comestible. ....	14
Cuadro 6. Compuestos fenólicos presentes en manzanas. ....	17
Cuadro 7. Resumen de magnitudes, símbolos y unidades en el SI de conceptos reológicos.....	31
Cuadro 8. Condiciones de extracción y nomenclatura de las pectinas. ....	38
Cuadro 9. Tipos de ingredientes y sus cantidades utilizadas para la elaboración de la salsa.....	45
Cuadro 10. Evaluación del color triestímulo en las diferentes pectinas.....	49
Cuadro 11. Resultado del porcentaje de metil-esterificación (porcentaje de esterificación) y peso molecular de las diferentes pectinas.....	51
Cuadro 12. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) de la	

pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas cosechadas a diferentes DDPF <sup>1</sup> .....	58
Cuadro 13. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas bajo refrigeración. ....	59
Cuadro 14. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas bajo atmosferas controladas. ....	60
Cuadro 15. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas a temperatura ambiente. ....	61
Cuadro 16. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir del jugo y bagazo. ....	62
Cuadro 17. Área bajo la curva del barrido ascendente y descendente de las pectinas*.....	64
Cuadro 18. Comparación de las variables reológicas (índice de consistencia = $K$ , índice de comportamiento de flujo = $n$ , y bondad del ajuste = $R^2$ ) y el incremento de la salsa control con las diferentes muestras de pectinas obtenidas por el modelo de Ley de Potencia. ....	73

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Principales variedades de manzanas cultivadas en el Estado de Chihuahua (Fuente: Facultad de Zootecnia, 2007) ..... 10
- Figura 2. Principales variedades de manzanas cultivadas en el Estado de Chihuahua (Fuente: Facultad de Zootecnia, 2007) ..... 12
- Figura 3. Estructura química de la pectina (a) y componentes estructurales (b). (Fuente: Li *et al.*, 2008; Mohnen, 2008)..... 20
- Figura 4. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzana cosechadas a diferentes DDPF y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. .... 66
- Figura 5. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas en refrigeración y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. 67
- Figura 6. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas en atmósfera controlada y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. .... 68

Figura 7. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas a temperatura ambiente y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. ....69

Figura 8. Porcentaje de histéresis de las pectinas de bagazo y jugo extraídas en diferentes solventes y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). Las pectinas marcadas con el círculo rojo se seleccionaron para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. PSA-B = Pectina soluble en agua extraída del bagazo de puré; PSQ-B = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de puré; PSAL-B = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de puré; PSQ-J = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de jugo; PSAL-J = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de jugo.70

Figura 9. Fotografías de la salsa control recién elaborada. Almacenada a condiciones de refrigeración (6 °C y 28 % HR, a y b) y a temperatura ambiente (24 °C y 40 % HR, c y d). ....72

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

$\log(\tau)$	Logaritmo decimal del esfuerzo cortante
$\log(\dot{\gamma})$	Logaritmo natural de la velocidad de corte
$s^{-1}$	Segundos a la menos uno, unidad de medida de la velocidad de corte
$R^2$	Bondad del ajuste
$N$	Índice de comportamiento de flujo
$K$	Índice de consistencia
% H	Porcentaje de histéresis
$\Delta K$	Porcentaje de incremento en el índice de consistencia
PCOM	Pectina comercial
P107DDPF	Pectina extraída de manzanas cosechadas 107 días después de la plena floración
P122DDPF	Pectina extraída de manzanas cosechadas 122 días después de la plena floración
P137DDPF	Pectina extraída de manzanas cosechadas 137 días después de la plena floración
P152DDPF	Pectina extraída de manzanas cosechadas 152 días después de la plena floración
P167DDPF	Pectina extraída de manzanas cosechadas 167 días después de la plena floración (cosecha comercial)
P0REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 0 días bajo refrigeración = P167DDPF
P30REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 30 días bajo refrigeración
P60REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 60 días bajo refrigeración
P90REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 90 días bajo refrigeración
P120REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 120 días bajo refrigeración
P150REF	Pectina extraída de manzanas almacenadas 150 días bajo refrigeración
P0AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 0 días bajo refrigeración = P167DDPF

P30AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 30 días bajo atmosfera controlada
P60AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 60 días bajo atmosfera controlada
P90AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 90 días bajo atmosfera controlada
P120AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 120 días bajo atmosfera controlada
P150AC	Pectina extraída de manzanas almacenadas 150 días bajo atmosfera controlada
P0TA	Pectina extraída de manzanas almacenadas 0 días bajo temperatura ambiente = P107DDPF
P30TA	Pectina extraída de manzanas almacenadas 30 días bajo temperatura ambiente
P60TA	Pectina extraída de manzanas almacenadas 60 días bajo temperatura ambiente
PSA-B	Pectina soluble en agua extraída del bagazo ó puré
PSQ-B	Pectina soluble en agente quelato extraída del bagazo ó puré
PSAL-B	Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo ó puré
PSQ-J	Pectina soluble en agente quelato extraída del jugo
PSAL-J	Pectina soluble en agente alcalino extraída del jugo

## RESUMEN

En el presente estudio se analizaron algunas propiedades fisicoquímicas (color tri-estímulo, grado de metil-esterificación y peso molecular) y reológicas (curvas de flujo en estado estable) de 23 pectinas extraídas en diferentes medios de solubilidad (solubles en agua, agente alcalino y quelato). Se aplicó el modelo de Ley de Potencia para determinar las variables “ $n$ ” y “ $K$ ” (índice de comportamiento de flujo e índice de consistencia, respectivamente), se seleccionaron las pectinas más adecuadas por sus características reológicas (mayor índice de consistencia y menor porcentaje de histéresis = % H) y se adicionaron en un sistema alimenticio (salsa para botanas). Se evaluaron nuevamente las variables  $n$  y  $K$  en la salsa control (sin pectina) y con las pectinas extraídas y se compararon con salsa con pectina comercial. Todas las pectinas presentaron un comportamiento reológico del tipo corte adelgazante (pseudoplástico) con valores “ $n$ ” que oscilaron desde 0.668 (pectina soluble en agente alcalino presente en jugo = PSAL-J) hasta 0.890 (pectina extraída de frutos almacenados a 30 días en refrigeración = P30REF) y valores  $K$  de 0.027 (pectinas extraídas de bagazo solubles en agentes quelatos = PSQ-B y en álcalis = PSAL-B) hasta 0.074 (pectina extraída de frutos almacenados durante 120 días en refrigeración = P120REF). Las evaluaciones reológicas de  $K$  y % H arrojaron que las pectinas P107DDPF (pectina extraída de manzanas cosechadas a los 107 días después de la plena floración), P120REF (pectina extraída de manzanas almacenadas durante 120 días en refrigeración), P150AC (pectina extraída de manzanas almacenadas durante 150 días en atmósfera controlada), P30TA (pectina

extraída de manzana almacenadas durante 30 días a temperatura ambiente), y PSQ-B (pectina soluble en agente quelato extraída del bagazo) fueron las más indicadas para utilizarse en la salsa. Con la adición de la pectina comercial se observó un incremento de  $\approx 37\%$  en el valor  $K$  de la salsa control, mientras que con las pectinas extraídas en diferentes solventes el incremento fue similar con valores que oscilaron desde un  $29\%$  (pectina soluble en agente quelato extraída del bagazo, PSQ-B),  $35\%$  (pectina extraída de frutos almacenados por 120 días a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , P120REF), y  $48\%$  (pectina extraída de frutos almacenados por 30 días a temperatura ambiente, P30TA) e incluso superior con valores de  $64\%$  y  $69\%$  (pectina extraída de frutos almacenados por 150 días en atmósferas controladas, P150AC y pectina extraída de frutos con 107 días después de plena floración, P107DDPF, respectivamente). Estos resultados demuestran el potencial de aplicación que pueden tener estas pectinas en sistemas alimenticios similares.

**Palabras clave:** Manzana, Pectina, Reología, Maduración, Histéresis

Correo Electrónico; Jesus Hernandez Cruz, [hernandezcruz.jesus@gmail.com](mailto:hernandezcruz.jesus@gmail.com)

## I. INTRODUCCIÓN

Las pectinas, son los biopolímeros más versátiles en cuanto a aplicaciones industriales alimenticias y no alimenticias se refieren. Se emplean como agentes espesantes, aglutinantes, gelificantes, sustitutos de grasa, impartidores de textura y cuerpo en los alimentos, agentes encapsulantes, retenedores de aromas y fragancias, formadores de películas biodegradables, solamente por mencionar algunas de las más importantes. Se obtienen principalmente de los tejidos de vegetales y frutos como los cítricos y las manzanas, y su método de aislamiento puede ser por agentes químicos, físicos, enzimáticos y/o una combinación de estos.

En la literatura científica están bien documentadas las diferencias estructurales (componentes adicionales a la estructura principal) de las pectinas que se extraen de diferentes fuentes botánicas y los efectos que diversos métodos de extracción pueden ejercer en sus propiedades fisicoquímicas y estructurales. La reología ha demostrado ser una de las principales herramientas científicas auxiliares en la caracterización de diversos biopolímeros y en el caso de las pectinas los métodos reológicos desempeñan una función importante en la aplicación potencial que pueden tener estos polisacáridos.

La industria alimenticia está ávida de biopolímeros que puedan ser empleados en los materiales alimenticios sin que alteren de manera significativa algunas otras propiedades de calidad y sobre todo que sean inocuos, amigables con el medio ambiente (que no generen contaminación y/o desequilibrios ecológicos) y sobre todo que sean baratos. En este sentido, la utilización de fuentes regionales abundantes y

sostenibles constituye una alternativa viable para proporcionar los biopolímeros necesarios.

Por tal razón, el empleo de frutos regionales como la manzana se convierte en una materia prima importante para la obtención de pectinas; sin embargo, los estudios básicos en cuanto al impacto que los factores, como los métodos de aislamiento y los estados de madurez pueden impartir en aspectos reológicos como la viscosidad y las propiedades de flujo son determinantes para sugerir sus potenciales aplicaciones tecnológicas en alimentos. Por todo lo anterior, el presente estudio evaluó las propiedades fisicoquímicas y reológicas de pectinas de manzana y su potencial aplicación en un sistema alimenticio tipo salsa. Los resultados indicaron que estas pectinas pueden competir o incluso aumentar la viscosidad de alimentos como la salsa en comparación con pectinas comerciales.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. LA MANZANA

#### 2.1.1. Generalidades

Etimológicamente la palabra manzana viene de latín *mattiana* de *mattius*, nombre de una especie de manzana, así llamada en memoria del agrónomo y botánico romano Caius Mattius, que vivió en el siglo I a. de C. El manzano pudo ser la primera especie frutal cultivada por el hombre. En la Biblia se menciona al manzano en varios pasajes, como el de Eva tentada por el demonio. Las manzanas son frutas que se han cultivado por miles de años en Asia y Europa allí se le atribuye el origen. Actualmente se ha extendido en todo el mundo, forman parte de las leyendas y narraciones de muchos países y religiones. Fue introducido en España por los pueblos del norte de África y durante el proceso de romanización de la península.

En su inicio la manzana era una fruta agria que se perfeccionó con la cultura grecorromana siendo en la Edad Media, una fruta muy apreciada y extendida que se podía adquirir a bajo precio (Anónimo, 2014). Hacia 1666, una manzana entró en la leyenda, el famoso físico y matemático inglés Isaac Newton estaba sentado bajo un manzano cuando se desprendió una manzana y le cayó en la cabeza. Aquello le despertó el interés por los problemas relacionados con la gravedad y terminó enunciando la Ley de Gravitación Universal. El siglo XIX representó una época de grandes esfuerzos para la mejora del manzano, y en la actualidad, es uno de los frutos más populares y disponible durante todo el año. Está considerada como una

fruta relacionada con la salud y con grandes propiedades dietéticas y culinarias (Infojardin, 2014).

Las condiciones adecuadas que requiere el manzano para su óptima adaptación son muchas horas de frío (más de mil). Un manzano sufre menos con el exceso de frío que con el de calor. Soporta temperaturas inferiores a los 10 °C bajo cero, aunque si desciende más allá de los 15 °C bajo cero, pueden perderse algunas yemas florales. Alcanza como máximo 10 m de altura y tiene una copa globosa. Tronco derecho que normalmente alcanza de 2 a 2.5 m de altura, con corteza cubierta de lenticelas, lisa, adherida, de color ceniciento verdoso sobre los ramos y escamosa y gris parda sobre las partes viejas del árbol. Tiene una vida de unos 60-80 años. Las ramas se insertan en ángulo abierto sobre el tallo, de color verde oscuro, a veces tendiendo a negruzco o violáceo.

Las hojas son ovales, cortamente acuminadas, aserradas, con dientes obtusos, blandas, con el haz verde claro y tomentosas, de doble longitud que el pecíolo, con 4-8 nervios alternados y bien desarrollados. Las flores son grandes, hermafroditas, de color rosa pálido, a veces blanco y en número de 3-6 unidades. La floración tiene lugar en primavera, generalmente por abril o mayo, y se recogen al final de verano o principio del otoño, pero varía en función de la variedad y prefiere solamente los climas fríos y le basta poca cantidad de luz y calor para la maduración de su fruto (Infojardin, 2014). La manzana es un fruto de estructura firme, carnosa, derivado del receptáculo de la flor. Difieren en cuanto a color, tamaño y sabor, según la variedad. (SIAP, 2014). La clasificación taxonómica de la manzana (*Malus domestica*) fue descrita por Moritz Balthasar Borkhausen en el año 1803 y se puede observar en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la manzana de acuerdo con Moritz Balthasar Borkhausen (1803).**

---

Super reino	<i>Eukariota</i>
Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Rosidae</i>
Orden	<i>Rosales</i>
Familia	<i>Rasaceae</i>
Subfamilia	<i>Maloideae</i>
Género	<i>Malus</i>
Especie	<i>M. domestica</i>

---

Fuente: Anónimo, 2014.

### **2.1.2. Producción y consumo**

El Estado de Chihuahua es el principal productor de manzana en el país y su aportación es del 70 % de la producción total, contando con una superficie de 25,695 Ha y una producción de 382,956 ton anuales con un valor de 1,361,428, 150 pesos. El ranking nacional en producción de manzana es ocupado por los Estados de Chihuahua, Coahuila, Durango y Puebla; siendo Chihuahua el líder indiscutible en superficie plantada, volumen producido, rendimiento unitario, tecnología productiva y conservación por refrigeración (SIAP, 2014).

A nivel estatal, el municipio de Guerrero en Chihuahua es el principal productor de la variedad *Golden delicious* y tiene el tercer lugar en la producción de manzana del estado (Cuadro 2 y 3) (SIAP, 2014).

**Cuadro 2. Superficie sembrada/cosechada, producción y rendimiento del fruto de manzana en la modalidad de riego y temporal durante los ciclos (cíclicos y perennes) del año 2012 por Distrito en el estado de Chihuahua.**

	<b>Distrito</b>	<b>Superficie sembrada (Ha)</b>	<b>Superficie cosechada (Ha)</b>	<b>Producción (ton)</b>	<b>Rendimiento (ton/Ha)</b>	<b>PMR (\$/ton)</b>	<b>Valor producción (miles de pesos)</b>
1	Balleza	766.00	766.00	4,896.00	6.39	2,998.12	14,678.80
2	Buenaventura	20.00	18.00	27.00	1.50	4,046.40	109.25
3	Casas Grandes/Nuevo Casas Grandes	650.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	Chihuahua	219.00	179.00	1,074.00	6.00	8,472.06	9,099.00
5	Cuauhtémoc	14,119.00	13,774.00	133,820.70	9.72	9,946.24	1,331,012.49
6	Madera	4,307.00	4,213.00	13,712.00	3.26	10,544.92	144,592.00
7	Papigochi	6,012.00	5,600.00	49,909.80	8.91	8,025.75	400,563.74
8	San Juanito	573.00	573.00	3,699.67	6.46	3,521.06	13,026.75
	<b>Total</b>	<b>26,666.00</b>	<b>25,123.00</b>	<b>207,139.17</b>	<b>8.25</b>	<b>9,235.73</b>	<b>1,913,082.03</b>

Fuente: SIAP, 2014.

**Cuadro 3. Superficie sembrada/cosechada, producción y rendimiento del fruto de manzana en la modalidad de riego y temporal durante los ciclos (cíclicos y perennes) del año 2012 en el Distrito de Cuauhtémoc, Chihuahua.**

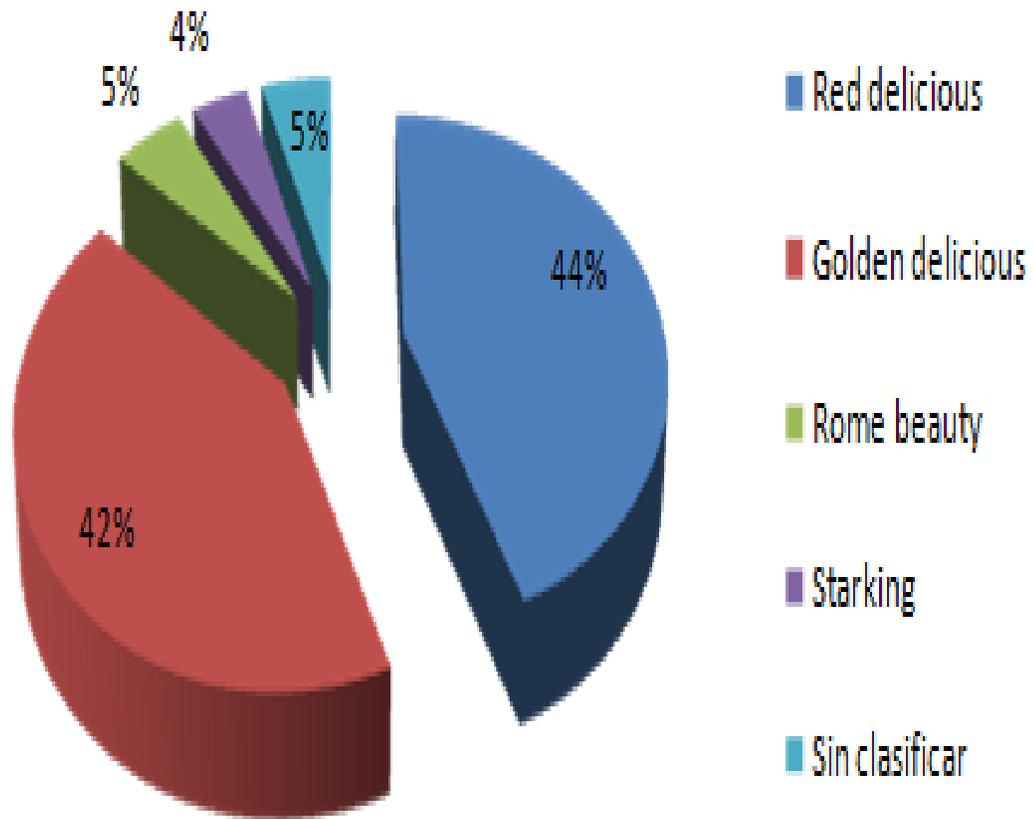
	<b>Municipio</b>	<b>Superficie sembrada (Ha)</b>	<b>Superficie cosechada (Ha)</b>	<b>Producción (ton)</b>	<b>Rendimiento (ton/Ha)</b>	<b>PMR (\$/ton)</b>	<b>Valor Producción (miles de pesos)</b>
1	Bachíniva	2,788.00	2,788.00	9,196.50	3.30	9,905.07	91,091.98
2	Carichí	640.00	630.00	10,802.00	17.15	8,103.69	87,536.01
3	Cuauhtémoc	8,030.00	7,695.00	82,094.20	10.67	10,596.20	869,886.51
4	Cusihuirachi	1,621.00	1,621.00	20,584.00	12.70	8,500.00	174,964.00
5	Riva Palacio	1,040.00	1,040.00	11,144.00	10.72	9,649.50	107,533.99
	Total	14,119.00	13,774.00	133,820.70	9.72	9,946.24	1,331,012.49

Fuente: SIAP, 2014.

### 2.1.3. Variedades

Las variedades de manzanos más cultivados en nuestro país (en las regiones de mayor producción) son las siguientes: *Red Delicious*, *Jonathan*, *Starking*, *Golden Delicious*, *Doble Red Delicious*, *Red ding*, *Granny Smith*, *Rome beauty*, principalmente. En donde la *Red delicious* y la *Doble Red delicious* se consideran como manzana de mesa, mientras que la *Winter banana*, *Sumer champion*, *Jonathan red*, *Golden Delicious*, *York imperial*, *Winter pearmain*, etc., se conocen como manzanas agroindustriales (Álvarez-Parrilla, 2012).

De acuerdo con la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), las principales variedades de manzana cosechadas durante el año 2006 en México fueron *Golden Delicious* (35.2 %) y *Red Delicious* (34.5 %) indicando que para el Estado de Chihuahua, las principales variedades cultivadas son las señaladas en la Figura 2. La fuente anterior cita como principal productor de la variedad *Red Delicious* al municipio de Cuauhtémoc (43.1 %), seguido de Casas Grandes (12.9 %) y Cusihuiachi (10 %) en cuanto a la superficie cosechada en el año 2006. Respecto a la variedad *Golden Delicious* los municipios líderes son Guerrero, Cuauhtémoc y Namiquipa con un 29 %, 23.5 % y 19 % respectivamente, en superficie cosechada para el mismo año.



**Figura 1. Principales variedades de manzanas cultivadas en el Estado de Chihuahua (Fuente: Facultad de Zootecnia, 2007)**

#### **2.1.4. El fruto**

Las cualidades que caracterizan a una manzana en cuanto a su tamaño, forma, y color son apenas un poco mayores a una cereza y casi tan grandes como una toronja o un melón mediano; globulares, cónicos con una depresión en cada uno de sus extremos; el color depende de la variedad y son desde verde claro, amarillas, rojas y rojo muy intenso casi negruzco, los lóbulos del cáliz son persistentes y la pulpa son células ásperas.

La temperatura óptima para la conservación de la fruta en condiciones normales es de 0 a 1 °C y para mantenerla en congelación es de -1 °C. El fruto presenta un porcentaje de humedad relativa entre 90 y 95 %, la tasa de respiración (mL CO<sub>2</sub>/kg h) varía de acuerdo a la temperatura a la que se encuentre almacenado (0 °C = 3 -6; 5 °C = 4-8; 10 °C = 5-10; 20 °C = 12-25) (Infoagro, 2014).



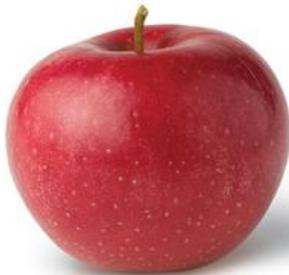
Braeburn



Reineta



Starking



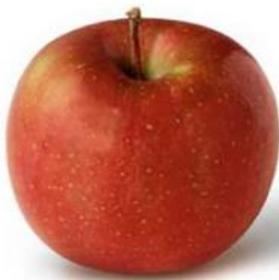
Red rome



Red delicious



Granny Smith



Fuji



Golden delicious



Gala

Figura 2. Principales variedades de manzanas cultivadas en el Estado de Chihuahua (Fuente: Facultad de Zootecnia, 2007)

### **2.1.5. Aspectos cualitativos y valor nutricional**

Las características específicas que debe presentar la manzana para considerarla de calidad son la firmeza en su piel, ausencia de daños o golpes, que no esté podrida, libre de arrugas, etc. (Infoagro, 2014). Las cualidades desde el punto de vista nutritivo de la manzana están ampliamente reconocidas, tanto por los profesionales de la nutrición como a nivel popular. Es especialmente elevado su contenido en potasio y bajo en sodio. El contenido en vitamina C es variable según el tipo de variedad y las condiciones de almacenamiento (Cuadro 4) (Infoagro, 2014).

**Cuadro 4. Valor nutricional de la manzana en 100 g de sustancia comestible.**

Substancia	Cantidad	Substancia	Cantidad
Agua (g)	84	Ácido málico (mg)	270 – 1020
Proteína (g)	0.3	Ácido cítrico (mg)	0 – 30
Lípidos (g)	0.6	Ácido oxálico (mg)	1.5
Carbohidratos (g)	15	Sodio (mg)	1
Calorías (kcal)	58	Potasio (mg)	116
Vitamina A (U.I.)	90	Calcio (mg)	7
Vitamina B1 (mg)	0.04	Magnesio (mg)	5
Vitamina B2 (mg)	0.02	Manganeso (mg)	0.07
Vitamina B6 (mg)	0.03	Hierro (mg)	0.3
Ácido nicótico (mg)	0.1	Cobre (mg)	0.08
Ácido pantoténico (mg)	0.1	Fosforo (mg)	10
Vitamina C (mg)	5	Azufre (mg)	5
		Cloro (mg)	4

Fuente: Infoagro, 2014.

### **2.1.6. Datos estadísticos**

De acuerdo con datos estadísticos proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA, los productos perennes presentaron un importante aumento en el periodo de 2014: la manzana subió 24 mil ton (para alcanzar finalmente 589 mil ton) (SIAP, 2014).

El promedio mundial de consumo por habitante ha manifestado en las últimas décadas una estabilización en torno a los 8 kg al año. El consumo por habitante, sin embargo, presenta grandes divergencias entre los diferentes países, mostrándose una mayor preferencia por este fruto en los países desarrollados y con larga tradición industrial. Otro de los grandes consumidores es Estados Unidos, en donde el consumo por habitante se ubica en torno a los 20 kg por habitante, que equivale a más del doble del promedio mundial. En este contexto internacional, el consumo por habitante en nuestro país, es aún débil, de sólo 6 kg al año, inferior al promedio mundial y muy por debajo del consumo que se realiza en países con una población que cuenta con mayor capacidad de compra (FAOSTAT, 2012).

### **2.1.7. Principales componentes químicos y estructurales**

Las manzanas contienen compuestos fenólicos (especialmente los flavonoides), vitamina C, antioxidantes y fibra dietética. La concentración de estos fitoquímicos es diversa y varia, dependiendo de ciertos factores como las condiciones de los cultivos, condiciones climatológicas, prácticas agronómicas, de cosecha y almacenamiento. Además, el perfil y el contenido de fitoquímicos en manzanas, especialmente los compuestos fenólicos, han demostrado ser muy diferentes en la pulpa que en la

cáscara de la fruta, estudios recientes ha demostrado que los compuestos fenólicos se encuentran en mayor concentración en la cáscara que en la pulpa de la manzana (Delgado-Pelayo *et al.*, 2014).

Los principales compuestos fenólicos que se encuentran en las manzanas son flavonoles, antocianinas, ácidos fenólicos, y dihidrochalconas. En manzanas, los flavonoles se presentan principalmente como glucósidos de quercetina conjugados como: galactósido, glucósido, xilósido, arabinósido, rutinósido y ramnósido. Considerando que la principal antocianina es cianidina-3-galactosidasa, (Sun *et al.* 2014) en comparación con los flavonoles las antocianinas, tales como catequina, epicatequina, procianidina B1, y procianidina B2 no están glicosiladas y pueden ser monoméricas u oligoméricas. Los ácidos fenólicos en las manzanas se dividen en dos subgrupos: ácidos hidroxicinámicos (ácido clorogénico en particular) y ácidos benzoicos (por ejemplo, ácido gálico). Por último, las manzanas también contienen dihidrochalconas en la forma de floridizina y sus derivados. (Chen *et al.*, 2012).

**Cuadro 5. Compuestos fenólicos presentes en manzanas.**

Grupo	Ejemplos	Estructura
Ácido hidrocínamico	Ácido clorogénico	Ácido clorogénico
Flavonoles	Catequina Epicatequina Procianidina B2 y otras	Epicatequina
Flavonoles	Q 3-galactósido Q 3-glucósido Q 3-xilosido Q 3-arabinósido Q 3-ramnosido	Q 3-galactósido
Dehidrochalconas	Floridizina	Floridizina
Antocianina	Cianidina 3-galactósido	Cianidina 3-galactósido

Fuente: Adaptado de Khanizadeh *et al.*, 2014.

## 2.2. ASPECTOS GENERALES DE LAS PECTINAS

La pectina es un compuesto natural de alto peso molecular que se encuentra en la pared celular y la estructura de la lámina media de todas las plantas superiores (Qiu *et al.*, 2009). Generalmente se considera como un polisacárido muy complejo que consiste de residuos de ácido D-galacturónico con enlaces  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4), y se caracteriza como pectina mayor o principal por estar integrado por fracciones de homogalacturano, ramnogalacturano I y ramnogalacturano II con grupos metilo parcialmente esterificados y contiene a lado de su cadena varios azúcares neutros como L-rhamnosa, L-arabinosa, y D-galactosa, principalmente (Monhen, 2008; Willats *et al.*, 2006; Wang y Lu, 2004).

Las pectinas presentan las propiedades funcionales de gelificación, espesante y estabilizante por lo que se emplean como recubrimientos en alimentos, en la industria médica, química y textil (Sato *et al.*, 2011). Se ha reportado que la pectina reduce el colesterol en la sangre, retrasa el vaciado gástrico, modula la respuesta inmunológica y la inducción de la apoptosis de las células de cáncer de colon (Ye *et al.*, 2008).

En general las principales materias primas para la producción de pectina comercial son pulpa de manzana y cáscara de cítricos. China, ahora es el más grande productor de manzana y jugos de manzana en el mundo, así como el aumento de los rendimientos de naranjas y zumo de naranja. Grandes cantidades de desecho de piel de cítricos y pulpa de manzana, como el producto primario de la fabricación, se producen anualmente, lo que conduce a un desgaste de recursos y crea problemas ambientales. Numerosos intentos se han hecho para utilizarlos como

fuelle de fibra dietética, alimentación, polifenoles, y como biocombustibles. Entre ellos, se cree que la extracción de pectina de la pulpa de manzana y piel de cítricos se considera la manera más razonable para ser utilizado (Shalini y Gupta, 2010). La pectina se produce industrialmente en condiciones ácidas con temperatura elevada (Koubala *et al.*, 2008). Las preocupaciones sobre el problema de contaminación de aguas residuales y ambientes acuosos ácidos hacen pensar en los métodos de extracción alternativos, que incluyen ultrasonido (Zhang *et al.*, 2013), enzimáticos (Ptichkina *et al.*, 2014), microondas (Fishman y Cooke, 2009) y agua sub-crítica (Ueno *et al.*, 2008).

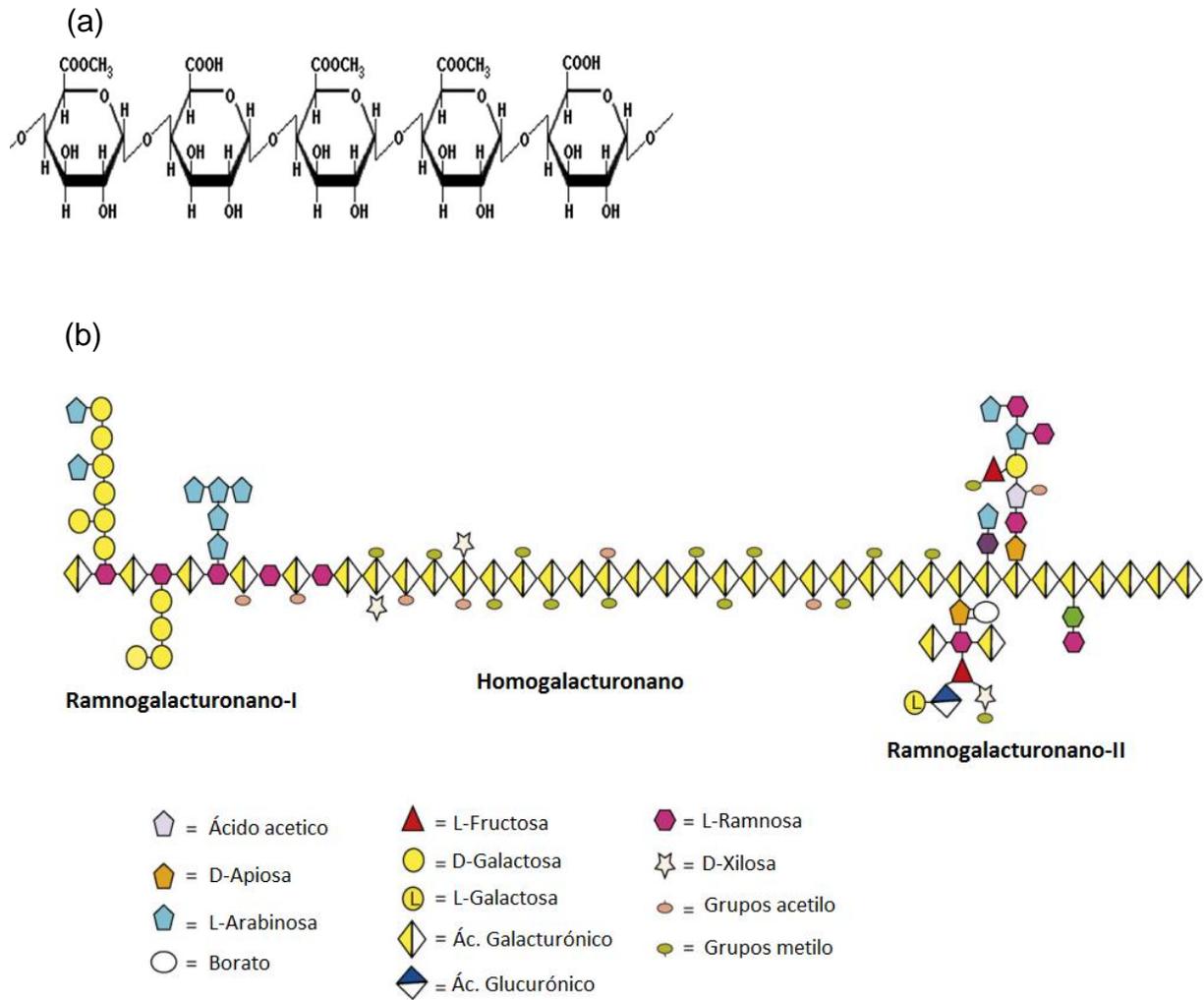


Figura 3. Estructura química de la pectina (a) y componentes estructurales (b). (Fuente: Li *et al.*, 2008; Mohnen, 2008).

### **2.2.1. Principales fuentes de obtención**

Las pectinas comerciales se obtienen generalmente de pulpas de manzana y cascara de cítricos ya que estos son los principales materiales de deshecho en la fabricación de jugos y esto despertó el interés de su aprovechamiento con el fin de minimizar la contaminación a causa de estos desperdicios y en base a estas fuentes se han estudiado sus propiedades tanto biológicas, como funcionales. Las pectinas se pueden encontrar en casi todas las especies vegetales en mayor o menor proporción dependiendo de la complejidad de su estructura molecular en la pared celular, por lo que su obtención es muy reducida (Willats *et al.*, 2006). Sin embargo, la utilización de la pectina de pulpa de manzana se sigue considerando como una de las maneras más razonables, tanto desde el punto de vista económico y ecológico (Srivastava y Malviya, 2001).

### **2.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN**

Comercialmente, las pectinas son extraídas utilizando agua caliente acidificada (60-100 °C) con algunos tipos de ácidos como el sulfúrico, fosfórico, nítrico, hidroclorehídrico y cítrico, principalmente y manteniendo el pH de 1.5-3 por 0.5-6 h (Koubala *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2014). Los métodos de extracción se pueden agrupar en tres grandes grupos, dependiendo de los reactivos, materiales y equipos utilizados en su extracción y pueden ser: físicos, químicos y enzimáticos.

### **2.3.1. Métodos físicos**

Los métodos físicos son aquellos que involucran factores como el calor y el ultrasonido. En este sentido, diversos investigadores han evaluado el potencial de extracción de estos métodos para pectinas de diversas fuentes botánicas. Recientemente Xu *et al.* (2014) investigaron los efectos del ultrasonido y/o calentamiento en el rendimiento de pectinas de cáscara de uva y observaron que las condiciones de extracción óptima se seleccionaron a través de un experimento de un solo factor y fueron: Una densidad de potencia ultrasónica de 0.40 W/mL, operación del ciclo al 50 %, temperatura de 60 °C, una relación sólido/líquido 1/50 g/mL. Estos resultados sugirieron que la extracción por calentamiento con ultrasonido podría ser una técnica eficiente para la extracción de pectinas de plantas y vegetales (Xu *et al.*, 2014).

### **2.3.2. Métodos químicos**

La obtención de pectinas por este método es de cierta manera complicado y su uso es restringido debido a los daños que los reactivos generan al medio ambiente, la aplicación de este método involucra el uso de agentes químicos y el uso de estos trae consigo riesgos en el medio ambiente, aunque este método muestra la mayor ventaja para la obtención de pectina se está optando por hallar otra forma menos agresiva de adquirir este polisacárido. Los reactivos químicos más utilizados en este método son, alcohol, y ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico, ácido hidroclorehídrico y ácido fosfórico, también se emplean ácidos orgánicos como el acético, oxálico y tartárico. Las sales que también se emplean son oxalato de

amonio, polifosfatos, entre otros. La manera en que se emplean estos reactivos influye en gran medida en las características de peso molecular de la pectina ya que las moléculas de los solventes químicos interactúan de forma intramolecular al extraer la pectina causando daños o alterando la conformación de dicho polímero (Patist y Bates, 2011).

Hasta ahora, muchos estudios se han realizado sobre la hidrólisis química de azúcares neutros contenidas en las paredes celulares (Kumar y Chauhan, 2010; Pingret *et al.*, 2013; Yapo, 2009). Las paredes celulares se componen de pectina y otros polisacáridos tales como celulosa, hemicelulosa, y los polímeros celulósicos. La cinética de hidrólisis difiere significativamente de un polímero a otro. La hidrólisis se realiza bajo condiciones drásticas con el objetivo de obtener la hidrólisis completa de los polímeros antes de la determinación de su composición de azúcares (Krogell *et al.*, 2013).

Después de la hidrólisis química o enzimática de pectina, muchos procedimientos se aplican habitualmente para la cuantificación de los monosacáridos liberados, tales como los métodos colorimétricos, cromatografía de gas/líquido (CGL), y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en Inglés).

### **2.3.3. Métodos enzimáticos**

La obtención de pectina por estos métodos conocidos también como extracción microbiológica ha venido evolucionando biotecnológicamente gracias al avance de la ciencia y la tecnología. La aplicación de este método se ha desarrollado cada vez más debido a la pureza de la pectina obtenida, ya que no sufre cambios drásticos en

su estructura molecular y la ventaja de emplear este método es reducir la contaminación comparada a los métodos de extracción química (este método es muy agresivo con el medio ambiente). Las enzimas comúnmente empleadas para la obtención de pectinas son las endo-poligalacturonasas ácidas de *Aspergillus kawachii*. La ingeniería genética ha revolucionado positivamente la aplicación de este proceso en las industrias alimentarias ya que permite la clonación y expresa en forma heterológica los genes de esta enzima (Contreras-Esquivel *et al.*, 1997).

## **2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE PECTINAS**

### **2.4.1. Caracterización física de pectinas**

Las pectinas se pueden identificar físicamente de acuerdo a su peso molecular (el cual oscila desde 1.03 hasta 150 kDa) en la pectina comercial, y generalmente estas pectinas se toman como referencia para compararlas con las que se obtienen de otras fuentes vegetales, además de su grado de purificación (Kumar y Chauhan, 2010). Se ha reportado que las fuentes principales de pectinas comúnmente utilizadas son las cáscaras de cítricos y manzanas, aunque se sigue intentando extraer este biopolímero de otras frutas con el objetivo de mejorar el rendimiento y las características fisicoquímicas principalmente, y eficientar la manera de su obtención. Para la caracterización física de la pectina comúnmente se emplean las técnicas de espectroscopia de infrarrojo y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

## 2.4.2. Caracterización química de pectinas

Las características de una pectina están basadas en sus enlaces y los grupos metilos presentes a lo largo de su estructura o cadena por lo que se les clasifica como pectina de alto y bajo metoxilo debido a los grupos  $^{-}\text{CH}_3$  presentes en su cadena. Esto, a su vez, determina su grado de esterificación y en base a esto la formación de geles. La característica principal que presenta una pectina es su enlace, ya que se compone de  $\alpha$ -D-(1-4) ácido galacturónico. Como se mencionó anteriormente, las mezclas complejas de los polisacáridos que constituyen a la pectina consisten en unidades de ácido  $\alpha$ -D galacturónico unidos por enlaces  $\alpha$ -(1-4) glicosídicos que conforman la cadena principal; otros azúcares como las unidades  $\beta$ -L-ramnosa en ocasiones se insertan a través de enlaces glicosídicos en la fracción (1-4), (2-1) y los grupos carboxilo están esterificados parcialmente por alcohol metílico o con cationes mono o divalentes. Otros azúcares neutros tales como arabinosa, galactosa, glucosa, xilosa y manosa se adhieren como cadenas laterales. La conformación de estos azúcares en la pectina es importante para la caracterización química de estos polímeros y también para el estudio de sus propiedades funcionales o biológicas (Garna *et al.*, 2004).

Los métodos disponibles para el análisis de carbohidratos de la pectina se basan principalmente en la determinación de residuos de azúcar obtenidos después de la hidrólisis química. Varios procedimientos químicos se emplean para la hidrólisis de las cadenas de azúcares neutros de la pectina. Se diferencian por la naturaleza del ácido, su concentración, el tiempo y la temperatura (Minjares-Fuentes *et al.*, 2014). Los agentes hidrolíticos más comúnmente utilizados son el ácido sulfúrico

(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido trifluoroacético (TFA), ácido clorhídrico (HCl), el ácido sulfúrico en metanol absoluto, HCl metanólico, y el ácido fluorhídrico (Renard *et al.*, 1995).

## **2.5. APLICACIONES DE LAS PECTINAS**

La efectividad de las pectinas para cualquier aplicación se determina por sus características estructurales, tales como la masa molar, el contenido de azúcares neutros, las proporciones de las regiones lineales y ramificadas, la sustitución de ácido ferúlico, cantidad de ésteres metoxi y acetilo, y la distribución de los grupos éster en el polímero (Atmodjo *et al.*, 2013; Awad *et al.*, 2012; Glinsky y Raz, 2009). Las pectinas tienen un gran número de aplicaciones debido a sus propiedades funcionales, este biopolímero es utilizado en industrias alimenticias, farmacéuticas y de cosméticos y se utilizan como agente estabilizante, emulsificante y espesante (Qiu *et al.*, 2009). En años recientes se ha descubierto que también tienen efecto en la reducción de ácidos grasos y azúcar en la sangre, debido a que disminuyen en gran medida el colesterol (Schwartz *et al.*, 1988).

### **2.5.1. Aplicación de las pectinas en la industria alimentaria**

El uso de las pectinas en la fabricación de los alimentos es cada vez más amplio debido a que se ha utilizado en los alimentos principalmente como agentes gelificantes, estabilizantes, o espesantes en productos como mermeladas, yogur para beber, jugos de fruta elaborados industrialmente, bebidas de leche y helados (Laurent y Boulenguer, 2003). Se emplean también como fibras dietéticas debido a la capacidad de formar geles acuosos, además de que estos geles de pectinas son

importantes para crear o modificar la textura de jaleas, salsa catsup, mayonesas, confiterías, y se emplean también en la elaboración de productos bajos en grasas, en bebidas dietéticas para la preparación de refrescos debido a su bajo contenido de carbohidratos ya que actúan como estabilizantes e incrementan la viscosidad (Vriesmann *et al.*, 2010).

Recientemente las pectinas se han empleado en la producción de películas comestibles y esto se puede lograr por diversos métodos empleados en la elaboración de materiales termoplásticos, tales como termo-moldeo, extrusión e inyección por soplado, principalmente. También se utilizan como sustitutos de grasas o azúcares en productos bajos en calorías que se emplean como recubrimientos en alimentos (Sato *et al.* 2011).

Otros estudios han reportado la factibilidad de utilizar la capacidad de formación de película de las pectinas para desarrollar tripas comestibles para productos cárnicos (Candogan y Kolsarici, 2003; Weiss *et al.*, 2010). Por ejemplo Liu *et al.* (2007) elaboraron embutidos de salchichas de cerdo utilizando cubiertas de pectina con 2.5 % de aceite de maíz y 5 % de aceite de oliva en comparación con una mezcla de gelatina/alginato de sodio con misma concentración de aceite de maíz y aceite de oliva. El análisis sensorial de dichas salchichas mostró que las cubiertas de pectina eran mayormente preferidos que las de la mezcla de gelatina/alginato de sodio y eran materiales factibles para la protección/cubierta de salchichas. Sin embargo, las pérdidas de agua de las salchichas cubiertas con pectinas fueron más altos que las que se cubrieron con la mezcla de gelatina/ alginato de sodio, probablemente debido al hecho de que la mezcla de gelatina/alginato de sodio tienen

una mayor capacidad para atrapar y absorber agua en comparación con las cubiertas de pectina (Liu *et al.*, 2007).

Recientemente se reportó el empleo de pectinas de alto y bajo metoxilo en una película comestible compuesta con una mezcla de nanoemulsiones de cinamaldehído/puré de papaya y se evaluaron diferentes propiedades físicas y mecánicas, además de su actividad antimicrobiana resultando una fuente alternativa como materiales antimicrobianos (Otoni *et al.*, 2014).

### **2.5.2. Aplicación biotecnológica de las pectinas**

Estudios recientes han publicado que las pectinas tienen efectos biodegradables al combinarse con cationes multi-valentes específicamente aluminio y calcio, con lo cual se obtienen aerogeles de moléculas entrecruzadas y esto hace que el producto sea más efectivo. Por citar algunos de los estudios sobresalientes, Chen *et al.* (2013) evaluaron la biodegradabilidad de los aerogeles mediante la detección de la liberación de CO<sub>2</sub> durante 4 semanas en medios de composta. Los resultados de estos investigadores revelaron que los aerogeles de pectina poseen mayores tasas de biodegradación que el almidón de trigo, que se utiliza a menudo como un estándar para la biodegradación eficaz. La adición de arcilla y cationes multi-valentes aumentó sorprendentemente las tasas de biodegradación. Los polímeros biodegradables y de base biológica son de creciente interés, debido a la limitante natural de adquirir los recursos de combustibles fósiles y una variedad de problemas ambientales. Tales polímeros de base biológica se producen principalmente a partir de recursos renovables, como la caña de azúcar, proteínas,

almidones, y aceites vegetales. El uso de estos materiales como alternativas a los productos petroquímicos puede disminuir la presencia de bióxido de carbono en productos de consumo e industriales, así como reducir sus impactos ambientales (Chen *et al.*, 2013).

## **2.6. REOLOGÍA**

La reología es una ciencia importante y necesaria en cuanto a que se ha convertido en una potencial herramienta en la evaluación, caracterización y desarrollo de las operaciones unitarias que están involucradas en la elaboración de los alimentos (Bourne, 2002). Es además, muy útil en el control de calidad de las materias primas y su desempeño durante la operación, transportación y textura final de los alimentos y de la materia en general (Nuñez-Santiago *et al.*, 2001).

### **2.6.1. Definición y aplicación**

La reología es una ciencia perteneciente a la parte de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia, y este término fue acuñado por Bingham y se aceptó por la sociedad Americana de Reología, la cual se fundó en 1929. Originalmente se aplicó a los materiales sometidos a la acción de fuerzas externas y a su relación con la deformación de los sólidos y el flujo con los fluidos, y de ahí su nombre. Estos últimos incluyeron a los líquidos y los gases, porque ambos pueden “fluir” y “adoptar la forma del recipiente que los contiene” (Barness *et al.*, 1989). Los términos más comúnmente empleados en reología son la “viscosidad” y la “elasticidad” de un material. Algunos autores han reportado que la mayoría de los

productos alimenticios responden a fenómenos reológicos complejos y su viscosidad está en función de su composición, de la temperatura, esfuerzo, velocidad de corte, tiempo de aplicación del esfuerzo, condiciones de extracción y preparación de las muestras (Gallego *et al.*, 2012).

La reología como ciencia aplicada se emplea en todas las áreas de estudio de cualquier material (sólido, líquido o gaseoso) para caracterizar la deformación o resistencia que ofrece el material y así tomar una decisión para su posterior utilización en el campo de interés que se pretenda. Todos los materiales tienen propiedades reológicas y el área que ocupa la caracterización reológica es de gran importancia en la tecnología de procesos. Existen varios campos en donde se pueden identificar la importancia de la caracterización reológica, entre estos campos podemos citar los cálculos en ingeniería de procesos en donde se involucren diversos equipos, formulación y desarrollo de productos alimenticios, control de calidad en productos intermedios y finales, evaluación de la textura de un alimento, estudio de la consistencia de productos alimenticios entre otros (Ochoa Ballesteros, 2012). La reología para su comprensión, estudio y aplicación, se vale de una serie de definiciones y conceptos los cuales a su vez están basados en magnitudes y unidades del sistema internacional de unidades (SI) como se puede apreciar en el Cuadro 7.

**Cuadro 6. Resumen de magnitudes, símbolos y unidades en el SI de conceptos reológicos.**

Magnitud	Símbolo	Unidad en SI
Esfuerzo de cizalla	$\sigma$	Pa
Deformación relativa	$\dot{\gamma}$	G
Velocidad de cizalla	$\dot{\gamma}$	s <sup>-1</sup>
Módulo elástico	G	Pa
Módulo de almacenamiento	G'	Pa
Módulo de pérdida	G''	Pa
Viscosidad	$\eta$	Pa·s

Fuente: Hernández-Lucas, 2001.

## **2.6.2. Métodos reológicos**

Dos diferentes tipos de métodos están disponibles para determinar el comportamiento reológico y son: El comportamiento estático y comportamiento dinámico oscilatorio. Las pruebas estáticas involucran la imposición de un cambio en el esfuerzo y/o la deformación, y las pruebas dinámicas involucran la aplicación de una variable que varía armónicamente con el esfuerzo y/o la deformación. Para fines de otorgar mayor claridad y porque solamente se utilizó en el desarrollo de la presente tesis el método estático, nos enfocaremos únicamente a este método; sin embargo en la literatura científica abundan interesantes descripciones sobre el método dinámico-oscilatorio (Barness *et al.*, 1989; Bourne, 2002; Steffe, 1996).

### **2.6.2.1. Método en estado estable**

Este método de prueba reológica se basa en la aplicación de un esfuerzo constante (llamado también prueba de relajación del esfuerzo) y en la determinación de curvas de flujo para determinar las variables de viscosidad ( $K$  = índice de consistencia y  $n$  = índice de comportamiento de flujo) de acuerdo a una ecuación reológica constitutiva o no. Además, se consideran en este método los ensayos de fluencia en pruebas de tensión o relajación constantes de tensión. En teoría, la tensión inicial o el esfuerzo (ya sea un aumento o una disminución) se considera que son aplicados de forma instantánea (Steffe, 1996).

Esto en la práctica no puede ser considerado como cierto, debido a la inercia en la carga y a los sistemas de medición y el retraso en la transmisión de la señal a través de la muestra de ensayo, determinada por la velocidad del sonido. Como regla

general, el tiempo requerido para que la señal de entrada alcance un valor constante debe ser corto en comparación con el tiempo durante el cual la variación de salida final será registrada. Esto generalmente limita los métodos para materiales que tienen tiempos de relajación de unos pocos segundos. Una técnica para estimar si la inercia en el aparato está influyendo en los resultados es cambiar deliberadamente la inercia por la adición de pesos (por ejemplo, comprobando el efecto sobre las funciones viscoelásticas) (Barness *et al.*, 1989).

### **III. HIPÓTESIS**

Las propiedades reológicas de un alimento tipo salsa se pueden mejorar en función de los diferentes cambios (estructura y composición) que sufren las pectinas de manzana durante su maduración, conservación y extracción.

## **IV. OBJETIVOS**

### **3.1. Objetivo general**

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y reológicas de pectinas de manzana obtenidas a diferentes estados de madurez y evaluar su potencial aplicación de algunas de estas en un sistema alimenticio tipo salsa.

### **3.2. Objetivos específicos**

3.2.1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de color, grado de metil-esterificación y peso molecular de pectinas de manzana a diferentes estados de madurez.

3.2.2. Determinar mediante curvas de flujo en estado estable las variables reológicas de las pectinas.

3.2.3. Calcular el porcentaje de histéresis de las pectinas aplicando ciclos ascendentes y descendentes.

3.2.4. Seleccionar al menos dos pectinas que presenten una mayor estabilidad reológica (mayor índice de consistencia y menor porcentaje de histéresis) para evaluar su comportamiento reológico en un sistema alimenticio tipo salsa.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Materiales

Para la obtención de las pectinas se utilizaron frutos de manzanas cosechadas en la huerta “La India” del grupo comercial La Norteña de acuerdo a lo reportado por el grupo de trabajo de Fitoquímicos y Nutrientes. Se seleccionaron 40 frutos, obtenidos de 10 árboles. De cada árbol se cosecharon 4 manzanas, 2 de la parte externa y 2 de la parte interna, a la mitad de la altura del árbol. La primera cosecha se realizó el 14 de julio (107 días después de la floración). Las cosechas continuaron en intervalos de 15 días, hasta el día de la cosecha (167 días después de la floración). A la fecha de cosecha comercial, se colectaron tres lotes de frutos los cuales se almacenaron bajo tres condiciones diferentes hasta por 5 meses: Condiciones ambientales normales (23 °C/aire/2 meses), refrigeración (0 °C/aire/5 meses) y atmósferas controladas (0 °C/2 % de O<sub>2</sub> y 3 % de CO<sub>2</sub>/5 meses). Se removi6 una muestra de frutos mensualmente de las diferentes condiciones de almacenamiento. Una parte de cada muestra de manzana se sometió a un proceso de extracci6n de pectina en condiciones ácidas, calculando gravim6tricamente el rendimiento de pectina. Por tal raz6n, las pectinas analizadas se proporcionaron por el laboratorio de Fitoquímicos, cuyo responsable es el Dr. Jos6 de Jes6s Ornelas Paz y el t6cnico laboratorista M. C. Emilio Ochoa Reyes. Las pectinas se identificaron por diferentes condiciones de extracci6n (ver Cuadro 8).

Para las pruebas reol6gicas se utiliz6 un re6metro con control del esfuerzo modelo 1500ex de la marca TA Instruments (New Castle, DE, USA) equipado con un

software y un baño de agua a flujo constante con control de la temperatura. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Carbohidratos, Empaques y Alimentos Funcionales (CEAF) bajo la responsabilidad y supervisión del Dr. Paul Baruk Zamudio Flores. Las determinaciones se realizaron al menos por triplicado para cada tipo de muestra y cada tipo de análisis.

Los ingredientes utilizados en la elaboración de la salsa tipo botana adquirieron en una tienda comercial local (Al Super®) ubicada en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua. Los ingredientes, las cantidades y el método de elaboración de la salsa se describen en la sección correspondiente a Métodos.

**Cuadro 7. Condiciones de extracción y nomenclatura de las pectinas.**

Pectina (Nomenclatura)	Factores físicos		
	Comercial	Temperatura <sup>&amp;</sup>	Número de extracción/Fecha de extracción (día/mes/año)
PCOM	Sigma- Aldrich	Nd	Nd
P30REF		0 °C	I/10/10/09
P60REF		0 °C	II/10/11/09
P90REF		0 °C	III/09/12/09
P120REF		0 °C	IV/09/01/10
P150REF		0 °C	V/06/02/10
P30AC		AC	I/09/10/09
P60AC		AC	II/09/11/09
P90AC		AC	III/08/12/09
P120AC		AC	IV/07/01/10
P150AC		AC	V/05/02/10
P30TA		TA	I/08/10/09
P60TA		TA	II/07/11/09
P107DDPF		Nd	14/07/09
P122DDPF		Nd	27/07/09
P137DDPF		Nd	10/08/09
P152DDPF		Nd	25/08/09
P167DDPF	Cosecha comercial (control)	Nd	10/09/09
PSA-B			
PSQ-B			
PSAL-B			
PSQ-J			
PSAL-J			

\*Se utilizó la siguiente nomenclatura: PSA-B = Pectina soluble en agua extraída del bagazo de puré; PSQ-B = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de puré; PSAL-B = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de puré; PSQ-J = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de jugo; PSAL-J = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de jugo. REF = Refrigeración (0 °C); <sup>&</sup>AC = Atmósferas controladas (0 °C/2% O<sub>2</sub>/3% CO<sub>2</sub>); TA = Temperatura ambiente (23 °C); Nd = No está determinado por ser una muestra comercial; DDPF = Días después de la plena floración.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Obtención de las pectinas**

Se utilizaron 20 frutos los cuales se cortaron en cuatro partes iguales. Dos cuartos opuestos de cada fruto se destinaron a la extracción de pectina de acuerdo a la metodología propuesta por Canteri *et al.* (2005). Estos dos cuartos se partieron en cubos de 2 × 2 cm. Los cubos se escaldaron con 1 L de agua en ebullición por 5 min. Con la finalidad de inhibir la actividad de enzimas pectolíticas. Los cubos se homogenizaron por 20 min empleando una licuadora casera. Posteriormente, el puré obtenido se mezcló con una solución acuosa de ácido cítrico al 6.2 % (p/v) ajustada a un pH de 2.5 con HCl concentrado. La proporción de puré de manzana y solución ácida fue de un gramo por 5 mL de solución. La mezcla se calentó hasta alcanzar la ebullición, manteniéndose esa temperatura (98 °C) por 150 min una vez fría, la mezcla se filtró a través de un círculo de papel Whatman No. 4. El sólido retenido se descartó, mientras que el volumen del extracto líquido se redujo a 1 L mediante liofilización. El extracto concentrado se mezcló con 3 L de etanol al 95 % (v/v) y se dejó reposar para promover la precipitación de la pectina. La pectina precipitada se recuperó mediante filtración a través de un papel Whatman No. 4. La pectina retenida se lavó secuencialmente con etanol (500 mL) y acetona (200 mL) para eliminar azúcares y proteínas no asociados a la pectina. La pectina se recuperó, se liofilizó por 24 h y se calculó el rendimiento gravimétricamente en g de pectina por 100 g de manzana en base seca. Las pectinas se almacenaron en una atmosfera inerte (Argón grado 5.0) a 4 °C hasta ser analizadas en cuanto a sus características fisicoquímicas.

## **4.2.2. Caracterización fisicoquímica**

### **4.2.2.1. Evaluación del color triestímulo**

Para la evaluación del color, las pectinas extraídas se molieron mecánicamente en un mortero. En las pectinas molidas se registraron 3 lecturas de color triestímulo empleando el colorímetro Minolta CR-300 (Minolta, Co. Ltd., Osaka, Japón). Se registraron las variables luminosidad ( $L^*$ ), croma ( $C^*$ ) y grados hue ( $^{\circ}h$ ).

### **4.2.2.2. Determinación del grado de metil-esterificación**

La liberación de metanol de la pectina se realizó en condiciones alcalinas según el método de Voragen *et al.* (1986), con algunas modificaciones. Se prepararon 0.6 mL de una solución acuosa de pectina al 1.7 %, la cual se dejó reposar por 24 h para promover su solubilización. Posteriormente se añadieron 100  $\mu\text{L}$  NaOH 7 M y 700  $\mu\text{L}$  de isopropanol, para hidrolizar la pectina y liberar el metanol. La hidrólisis se realizó por 2 h a temperatura ambiente en total reposo. La reacción se centrifugó a  $1200 \times g$  / 10 min y se tomaron 800  $\mu\text{L}$  del sobrenadante, a los cuales se adicionaron 10  $\mu\text{L}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado para ajustar su pH a 3.

El extracto se filtró a través de una membrana de nylon (Albet Labscience; Barcelona, España) con un tamaño de poro de 2  $\mu\text{m}$  antes de ser inyectado (20  $\mu\text{L}$ ) a un sistema de HPLC (Varian Inc., Walnut Creek, California, USA), el cual estuvo compuesto por una bomba ternaria (Solvent Delivery System Model 9012) y un detector de índice de refracción (Modelo Star 9040). Se utilizó agua como fase móvil (1 mL/min) y una columna de intercambio iónico TSKGel SCX  $\text{H}^+$  (30  $\times$  7.8 mm) (Tosoh Bioscience, Tokio, Japón). El contenido de ácido galacturónico en la pectina,

necesario para calcular el grado de metil-esterificación se determinó colorimétricamente y por HPLC con la finalidad de comparar ambas técnicas. La liberación del ácido galacturónico se realizó empleando la metodología descrita por Ahmed y Labavitch (1977). Para esto se pesaron por duplicado 5 mg de pectinas en tubos de vidrio, añadiendo 2 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado y 1 mL de agua desionizada. Los tubos se colocaron en hielo y gradualmente se adicionó agua hasta ajustar el volumen total de la reacción a 10 mL. Las muestras se centrifugaron por 10 min a 2000 × g a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), previo a realizar el ensayo colorimétrico, el cual se llevó a cabo mediante el método descrito por Filisetti-Cozzi y Cárpita (1991).

Para cada hidrolizado se prepararon 3 tubos, cada uno de los cuales contuvo 400 µL de cada sobrenadante (1200 µL en total), 40 µL de una solución de 4 M de sulfamato (ajustado a un pH de 1.6) y 2.4 mL de una solución 75 mM de tetraborato de sodio en ácido sulfúrico concentrado. Los tubos se colocaron en baño María a 100°C por 20 min. Se enfriaron, colocándolos en hielo por 10 min, y se les añadieron 80 µL de una solución de m-hidroxidifenil a 2 tubos de cada muestra, mientras que al tercer tubo se añadieron 80 µL de una solución de NaOH al 0.5 % (esta se consideró como la muestra control). Los tubos se agitaron en vórtex tres veces. Una vez que la muestra adquirió una tonalidad rosa, lo cual sucedió después de 5-10 min. Se le determinó su absorbancia a una  $\lambda = 525$  nm en un espectrofotómetro marca Jenway modelo 6505 (Jenway Ltd., Essex, Inglaterra). El valor se corrigió considerando el de la muestra control.

#### **4.2.2.3. Determinación del peso molecular**

Se preparó solución acuosa de pectina al 0.5 %. La solución se mantuvo en un baño María a 70 °C por 12 h para promover su solubilización. Posteriormente, se sonicó por 10 min (Sonicador Branson 1510R; Branson Ultrasonics, Connecticut, USA). Las muestras se filtraron a través de una membrana de nylon con un tamaño de poro de 0.2  $\mu\text{m}$ , previo a ser inyectadas (20  $\mu\text{L}$ ) al sistema cromatográfico. El sistema cromatográfico incluyó tres columnas de SEC unidas en serie (TSKGel GMPWXL, TSKGel G4000MPWXL y TSKGel G3000MPWXL; 30  $\times$  7.8 mm) (Tosoh Bioscience, Tokio, Japón). Las columnas se operaron a 40 °C. Se utilizó buffer de fosfatos 0.2 M (pH = 6.9) como fase móvil a un flujo de 0.4 mL/min. La distribución de peso moleculares en las pectinas se determinó empleando dextransos de peso molecular conocido en el rango de 1 a 670 kDa.

#### **4.2.3. Evaluación reológica de las pectinas**

##### **4.2.3.1. Curvas de flujo**

Las muestras de pectinas se disolvieron en agua destilada para dar una concentración del 1 % (p/v). Se determinó la viscosidad aparente de estas soluciones a 25 °C utilizando un reómetro con control del esfuerzo AR 1500ex (TA Instruments, New Castle, DE, USA) equipado con una geometría de cono (4 °, diámetro de 40 mm) de acero inoxidable y placa Peltier para el control de la temperatura. Se trabajó con un gap de truncación de 90 mm. Se realizaron tres barridos a las velocidades de corte de 0.01 a 500  $\text{s}^{-1}$  (curva ascendente), 500 a 0.01  $\text{s}^{-1}$  (curva descendente), y finalmente un tercer barrido de 0.01 a 500  $\text{s}^{-1}$  sobre el cual los datos de velocidad de

corte contra esfuerzo cortante se ajustaron utilizando el modelo de Ley de Potencia ( $\tau = K \gamma^n$ ), del cual se obtuvieron como variables de respuesta el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) y el índice de consistencia ( $K$ ).

#### **4.2.3.2. Porcentaje de histéresis**

El porcentaje de histéresis (% H) es un indicativo de la estabilidad que presentan las pectinas bajo ciertas condiciones de esfuerzo cortante o cizalla, de tal manera que es un indicativo directo de su potencial aplicación en alimentos que sufren constantes deformaciones. Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% H = \left( \frac{\text{Rampa 1} - \text{Rampa 2}}{\text{Rampa 1}} \right) \times 100$$

Donde Rampa 1 corresponde al área bajo la curva ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) del barrido ascendente y Rampa 2 se refiere al área bajo la curva ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) del barrido descendente.

#### **4.2.4. Elaboración de la salsa**

Para la elaboración de la salsa tipo botana se emplearon los ingredientes descritos en el Cuadro 9. Las cantidades están basadas en una cantidad total de 500 mL. Los chiles se expusieron directamente a la radiación solar ( $15 \pm 5$  °C;  $50 \pm 10$  % HR) durante 4 h para deshidratarlos. Posteriormente se molieron en un mortero con un pistilo hasta obtener un polvo fino de tamaño uniforme (malla 100, ASTM). Los ingredientes descritos en el Cuadro 9 se pesaron en una balanza, después se depositaron en un vaso de precipitados de 1 L, se colocaron en una placa de calentamiento uniforme (Corning, México) a 25 °C y se agitaron a 300 rpm por medio

de un agitador-homogenizador (stirrer, modelo RW20 digital, marca IKA, USA) durante 5 h. Esta salsa se trabajó como la salsa control.

**Cuadro 8. Tipos de ingredientes y sus cantidades utilizadas para la elaboración de la salsa.**

<b>Ingredientes</b>	<b>Cantidad*</b>
Chile seco	20.0150 g
Azúcar	8.5040 g
Sal	5.0790 g
Consomé de pollo (Knorr® Suiza Caldo de Pollo )	2.5000 g
Pimienta	1.2540 g
Comino	1.2500 g
Vinagre	8.0135 mL
Agua purificada	453.3840 mL

\*Cantidad basada en un total de 500 mL.

#### 4.2.5. Evaluación reológica de la salsa control y con pectinas

Para realizar los experimentos reológicos de salsa control y con pectinas, se añadieron las pectinas de los diferentes métodos de extracción a una concentración de 1 % (p/p). Se tomaron 70 mL de salsa con pectina en un vaso de precipitados de 80 mL. Se colocaron en una placa de calentamiento (con agitación controlada digitalmente) y con la ayuda de un agitador magnético se agitó de manera uniforme a 415 rpm para una disolución homogénea. Una vez mezclada homogéneamente la muestra (salsa con pectina), se tomaron 16 mL de la muestra y se vertieron en la geometría del reómetro (cilindros concéntricos) para realizar las evaluaciones reológicas descritas anteriormente. Se determinaron las propiedades reológicas por medio del modelo de Ley de Potencia ( $\tau = K\dot{\gamma}^n$ ).

Se evaluaron las variables de índice de consistencia ( $K$ ), índice de comportamiento de flujo ( $n$ ), la bondad del ajuste ( $R^2$ ) y el porcentaje en el incremento de viscosidad ( $\Delta K$ ) determinado en función de  $K$  mediante la aplicación de la fórmula  $\Delta K = [(K_p - K_c) / K_p] \times 100$ . Donde  $K_p$  = Valor  $K$  de la salsa con pectina;  $K_c$  = Valor  $K$  de la salsa control. Esto con la finalidad de tener una medida arbitraria de la consistencia (viscosidad) que las pectinas pueden impartir a un sistema alimenticio tipo salsa.

### **4.3. Análisis estadístico**

Los experimentos se llevaron a cabo con un diseño completamente aleatorizado. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) a un nivel de significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ). Para la obtención de los resultados se utilizó el programa estadístico Sigma-Plot para Windows Versión 12.5 (Systat Software, Inc., Alemania). Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (Walpole et al., 1999). En todos los experimentos y determinaciones el tamaño mínimo de repeticiones fue de 3 ( $n = 3$ ) para cumplir con los criterios de normalidad y homogeneidad de varianza.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Propiedades fisicoquímicas de las pectinas

Las propiedades fisicoquímicas determinadas consistieron en la evaluación de color, grado de metil-esterificación y determinación del peso molecular. La evaluación de color se puede apreciar en el Cuadro 10. El grado de metil-esterificación y determinación del peso molecular se aprecian en el Cuadro 11.

#### 5.1.1. Evaluación del color triestímulo

Se observaron diferencias significativas en cuanto a las variables  $L^*$ ,  $C$  y  $^{\circ}hue$  en las diferentes pectinas evaluadas (Cuadro 10). El método de obtención mostró un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) debido a que los diferentes solventes y la temperatura de secado afectaron la coloración de las pectinas a causa de posibles reacciones de caramelización y formación de compuestos oscuros como la melanoidinas. Esto es congruente con lo reportado por Constela *et al.* (2002) en un estudio en el cual observaron que la temperatura influyó en la coloración de las pectinas obtenidas de frutos de manzana de la variedad Granny Smith. Otro factor importante en la coloración de las pectinas, es la presencia de pigmentos y polifenoles presentes en la fruta al momento de la extracción ya que estos compuestos pueden ser fácilmente arrastrados al momento de la extracción (Devia *et al.*, 2003).

**Cuadro 9. Evaluación del color triestímulo en las diferentes pectinas.**

Pectina <sup>§</sup>	Variable de color triestímulo <sup>&amp;</sup>		
	L*	C	°hue
PCOM	71.70 ± 3.37 <sup>c</sup>	23.80 ± 1.56 <sup>a</sup>	55.10 ± 0.95 <sup>d</sup>
P107DDPF	73.80 ± 0.98 <sup>c</sup>	12.60 ± 0.89 <sup>e</sup>	36.11 ± 0.95 <sup>i</sup>
P122DDPF	72.68 ± 1.12 <sup>c</sup>	12.11 ± 0.72 <sup>e</sup>	35.87 ± 0.87 <sup>j</sup>
P137DDPF	70.36 ± 0.98 <sup>c</sup>	11.90 ± 0.33 <sup>f</sup>	36.10 ± 0.80 <sup>i</sup>
P152DDPF	73.15 ± 0.69 <sup>c</sup>	12.15 ± 0.58 <sup>e</sup>	35.15 ± 0.95 <sup>j</sup>
P167DDPF	80.17 ± 2.80 <sup>b</sup>	17.90 ± 0.67 <sup>d</sup>	37.14 ± 0.90 <sup>h</sup>
P30REF	85.63 ± 2.25 <sup>a</sup>	20.50 ± 1.11 <sup>b</sup>	50.35 ± 1.02 <sup>e</sup>
P60REF	86.78 ± 1.17 <sup>a</sup>	21.35 ± 1.20 <sup>b</sup>	50.87 ± 0.87 <sup>e</sup>
P90REF	84.33 ± 2.10 <sup>b</sup>	18.35 ± 0.98 <sup>c</sup>	48.90 ± 0.28 <sup>f</sup>
P120REF	83.15 ± 3.53 <sup>b</sup>	18.20 ± 0.58 <sup>c</sup>	47.98 ± 1.23 <sup>f</sup>
P150REF	82.75 ± 2.60 <sup>b</sup>	17.98 ± 1.05 <sup>d</sup>	46.36 ± 0.87 <sup>f</sup>
P30AC	83.58 ± 3.36 <sup>b</sup>	18.10 ± 0.80 <sup>c</sup>	47.11 ± 1.02 <sup>f</sup>
P60AC	85.80 ± 2.40 <sup>a</sup>	21.30 ± 1.17 <sup>b</sup>	40.90 ± 0.79 <sup>g</sup>
P90AC	84.21 ± 3.39 <sup>b</sup>	18.30 ± 0.85 <sup>c</sup>	41.36 ± 0.88 <sup>g</sup>
P120AC	83.80 ± 3.80 <sup>b</sup>	17.68 ± 0.78 <sup>d</sup>	40.36 ± 1.25 <sup>g</sup>
P150AC	84.18 ± 2.58 <sup>b</sup>	17.45 ± 0.35 <sup>d</sup>	40.15 ± 1.35 <sup>g</sup>
P30TA	81.25 ± 1.87 <sup>b</sup>	18.10 ± 0.87 <sup>c</sup>	41.75 ± 0.90 <sup>g</sup>
P60TA	82.63 ± 3.36 <sup>b</sup>	18.25 ± 0.68 <sup>c</sup>	38.17 ± 1.25 <sup>h</sup>
PSA-B	52.61 ± 0.10 <sup>e</sup>	9.58 ± 0.07 <sup>g</sup>	60.95 ± 0.06 <sup>c</sup>
PSQ-B	74.24 ± 0.27 <sup>c</sup>	11.98 ± 0.09 <sup>f</sup>	73.45 ± 0.12 <sup>a</sup>
PSAL-B	64.53 ± 0.14 <sup>d</sup>	12.89 ± 0.07 <sup>e</sup>	71.16 ± 0.19 <sup>b</sup>
PSQ-J	73.65 ± 0.38 <sup>c</sup>	12.01 ± 0.02 <sup>e</sup>	73.12 ± 0.15 <sup>a</sup>
PSAL-J	65.10 ± 0.20 <sup>d</sup>	12.93 ± 0.05 <sup>e</sup>	71.25 ± 0.21 <sup>b</sup>

\*Media aritmética de al menos tres determinaciones independientes ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>&</sup>Los datos de las pectinas P137DDPF hasta la pectina PSQ-B se obtuvieron de la investigación preliminar del grupo de trabajo. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

### 5.1.2. Grado de metil-esterificación

En el Cuadro 11 se observa el grado de metil-esterificación (porcentaje de esterificación) de las diversas pectinas analizadas. Este valor osciló desde 2.5 % (Pectina soluble en agente alcalino extraída del jugo, PSAL-J) hasta 65.1 % (pectina comercial, PCOM). Cuando se compararon estos valores se observaron disminuciones significativas entre las diversas pectinas obtenidas de los diferentes tratamientos a los cuales se sometieron las manzanas. Fischer *et al.* (1994) observaron un comportamiento similar en pectinas de variedades similares de manzanas, pero cultivadas en Suiza. Esta disminución del grado de metilación la atribuyeron a un incremento en el contenido de ácido galacturónico y aun ligero descenso en el contenido de metanol (datos no determinados). La disminución en el contenido de metanol es causada por el aumento en la actividad de la enzima pectinmetilesterasa, que hidroliza los grupos metilos de la pectina (Ren y Kermode, 2000). Se ha observado el aumento de la actividad de esta enzima durante el desarrollo de la manzana hasta el momento de su cosecha (Goulao *et al.*, 2007).

La desmetilación de la pectina tiene varios efectos en el tejido de la manzana, siendo uno de ellos el aumento de la acidez de la manzana, lo cual afectó la actividad de diversas enzimas (Draye y Cutsem, 2008). También alteró la asociación entre las cadenas de pectina, ya que un menor grado de metilación se relacionó con una mayor asociación con iones de calcio (Klein, 1994).

**Cuadro 10. Resultado del porcentaje de metil-esterificación (porcentaje de esterificación) y peso molecular de las diferentes pectinas.**

Pectina <sup>§</sup>	% Esterificación <sup>&amp;</sup>	Peso molecular (kDa) <sup>&amp;</sup>
PCOM	65.10 ± 2.37 <sup>a</sup>	623.80 ± 10.25 <sup>g</sup>
P107DDPF	23.60 ± 1.85 <sup>b</sup>	1790.50 ± 30.90 <sup>c</sup>
P122DDPF	22.68 ± 1.52 <sup>c</sup>	1712.21 ± 20.82 <sup>c</sup>
P137DDPF	20.36 ± 1.80 <sup>d</sup>	1641.90 ± 30.35 <sup>d</sup>
P152DDPF	23.25 ± 0.89 <sup>e</sup>	1620.45 ± 20.86 <sup>d</sup>
P167DDPF	20.80 ± 3.71 <sup>d</sup>	1787.60 ± 20.67 <sup>c</sup>
P30REF	15.23 ± 1.55 <sup>e</sup>	1780.50 ± 50.22 <sup>c</sup>
P60REF	16.18 ± 1.70 <sup>e</sup>	1680.85 ± 60.20 <sup>d</sup>
P90REF	14.90 ± 3.10 <sup>f</sup>	1568.55 ± 50.98 <sup>e</sup>
P120REF	13.25 ± 2.53 <sup>f</sup>	1458.60 ± 30.88 <sup>f</sup>
P150REF	12.85 ± 1.60 <sup>f</sup>	1777.65 ± 25.50 <sup>c</sup>
P30AC	13.68 ± 2.60 <sup>f</sup>	1810.10 ± 30.50 <sup>b</sup>
P60AC	15.50 ± 1.40 <sup>f</sup>	1721.30 ± 21.67 <sup>c</sup>
P90AC	14.11 ± 2.39 <sup>f</sup>	1638.30 ± 20.85 <sup>d</sup>
P120AC	13.90 ± 2.80 <sup>f</sup>	1537.78 ± 25.78 <sup>e</sup>
P150AC	14.81 ± 2.78 <sup>f</sup>	1517.65 ± 10.35 <sup>e</sup>
P30TA	11.55 ± 1.78 <sup>g</sup>	1718.10 ± 50.77 <sup>c</sup>
P60TA	12.36 ± 2.36 <sup>f</sup>	1678.85 ± 30.88 <sup>d</sup>
PSA-B	32.93 ± 0.39 <sup>b</sup>	392.23 ± 12.10 <sup>h</sup>
PSQ-B	9.85 ± 0.67 <sup>h</sup>	1868.40 ± 12.65 <sup>b</sup>
PSAL-B	4.30 ± 0.24 <sup>i</sup>	2909.19 ± 65.66 <sup>a</sup>
PSQ-J	8.96 ± 0.41 <sup>i</sup>	1895.51 ± 10.02 <sup>b</sup>
PSAL-J	2.53 ± 0.16 <sup>k</sup>	2945.63 ± 20.25 <sup>a</sup>

\* Media aritmética de al menos tres determinaciones independientes ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>&</sup>Los datos de las pectinas P137DDPF hasta la pectina PSQ-B se obtuvieron de la investigación preliminar del grupo de trabajo. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

En las pectinas extraídas de las manzanas sometidas a dos meses en temperatura ambiente (pectina P30TA y P60TA) y refrigeración (pectina P30REF,

P60REF, P90REF, P120REF y P150REF) cuando se compararon con las pectinas extraídas en diferentes solventes (pectinas PSA-B, PSQ-B, PSAL-B, PSQ-J y PSAL-J) se observó un aumento en el grado de metilación incluso hasta niveles del 90 %; el cual posteriormente disminuyó a 85 % al término del almacenamiento en refrigeración. Este comportamiento fue similar al observado en pectina aislada de manzanas *Golden delicious* cultivadas en Suiza, en la cual el grado de metilación aumentó hasta un 100 % después de 3 meses de almacenamiento en refrigeración, para luego disminuir hasta un 72.8 % durante los dos meses restantes de almacenamiento (Fischer *et al.*, 1994).

### **5.1.3. Determinación del peso molecular**

La determinación del peso molecular en las pectinas (Cuadro 11) indicó variaciones significativas entre las diversas pectinas comerciales, las obtenidas de manzanas a diversas condiciones físicas y las pectinas que se obtuvieron con diferentes solventes acuosos. Lo cual indicó que los diferentes factores físicos (temperatura de almacenamiento, presencia y/o ausencia de aire, luz y atmósferas controladas) y químicos (solventes) afectan de manera significativa el proceso de depolimerización de las sustancias pecticas (Huber, 1983; Redgwell *et al.*, 1997; Yoshioka *et al.*, 1992).

Los resultados de peso molecular indicaron variaciones desde 392 kDa (pectina PSA-B) hasta  $\approx$  2950 (pectinas PSAL-B y PSAL-J). Estos resultados están de acuerdo con los valores reportados por Fischer *et al.* (1994), los cuales oscilaron desde 100 kDa hasta 10,000 kDa en pectinas de manzana *Golden delicious* en pre-

cosecha. Estos resultados, corroboran lo realizado en un estudio reportado por Siddiqui *et al.* (1996) en el cual se encontraron ligeras diferencias en el peso molecular de la pectina de manzana *Golden delicious* al momento de la cosecha y después de 6 meses de almacenamiento en refrigeración. En manzana no se ha observado la actividad de la enzima poligalacturonasa (Yoshioka *et al.*, 1992), por lo que los cambios ocurridos en el peso molecular de la pectina pueden deberse a una pérdida de ramificaciones laterales, ocasionada por la acción de glucosidasas como la  $\beta$ -galactosidasa y L-arabinofuranosidasa (Peña y Cárpita, 2004).

## **5.2. Propiedades reológicas**

### **5.2.1. Curvas de flujo**

Las pectinas se caracterizaron de acuerdo a su viscosidad aparente y los patrones de flujo de sus soluciones. De manera general, la viscosidad de las soluciones de todos los tipos de pectinas mostraron una disminución cuando la velocidad de corte incrementó, indicando un comportamiento del tipo corte adelgazante (pseudoplástico) principalmente dentro del intervalo de 0 a  $100 \text{ s}^{-1}$  con valores  $R^2$  superiores a 0.95 en cuanto a la bondad del ajuste. Esto indicó que el modelo de Ley de Potencia utilizado fue el más conveniente y adecuado para describir las variables reológicas. En el Cuadro 12 se presentan los valores de las variables de ley de potencia para las pectinas obtenidas a partir de manzanas cosechadas a diferentes días después de la plena floración (DDPF) y la pectina comercial (PCOM). El estado de madurez del fruto no afectó de manera significativa ( $p > 0.05$ ) el comportamiento de flujo ( $n$ ) de las pectinas. Para todos los estados de

madurez y en la pectina comercial el índice de flujo fue menor al de un comportamiento Newtoniano ( $n = 1$ ) resultando un comportamiento pseudoplástico ( $n < 1$ ), caracterizándose éste último por un adelgazamiento del fluido con el aumento de la velocidad de corte.

Sin embargo, como se puede apreciar en el Cuadro 12, el índice de consistencia ( $K$ ) indicó variaciones significativas entre las diferentes pectinas. La viscosidad permaneció casi constante a mayores velocidades de corte ( $> 100 \text{ s}^{-1}$ ). Esta característica (disminución de la viscosidad con el incremento en la velocidad de corte) es atribuida a una desviación del comportamiento Newtoniano, indicada por un valor menor en el índice de comportamiento de flujo ( $n < 1$ ) lo cual se observa en el Cuadro 12. Sin que se observaran diferencias significativas en el valor  $n$  entre las diversas pectinas. En el Cuadro 13 se observan los parámetros  $K$  (índice de consistencia) y  $n$  (índice de comportamiento flujo) del modelo de Ley de potencia para las pectina comercial y las pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas bajo refrigeración ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de 0 a 150 días. El comportamiento de flujo registrado estuvo dentro del esperado para este tipo de polisacáridos ( $n < 1$ ), por lo cual se caracterizan como dispersiones pseudoplásticas (Steffe, 1996).

La pectina comercial, al igual que las pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas después de 30 días no presentaron diferencia significativa en la variable de índice de comportamiento de flujo ( $n$ ); sin embargo en la pectina extraída de manzanas a cero días de refrigeración ( $P0REF = 167 \text{ DDPF}$ ) el índice de comportamiento de flujo fue menor ( $p < 0.05$ ). En lo que respecta al índice de consistencia  $K$  (Cuadro 13), el menor valor se observó en la pectina comercial. El

índice de consistencia aumentó después de 30 días de refrigeración y se mantuvo constante hasta los 90 días de almacenamiento para posteriormente aumentar a los 120 días y finalmente volvió a descender a 150 días bajo refrigeración. En lo que respecta a las variables reológicas de la Ley de potencia de las pectina obtenida a partir de manzanas mantenidas en almacenamiento bajo atmosfera controlada y pectina comercial (Cuadro 14), el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) osciló desde 0.8086 a 0.8812, por lo que se mantuvo un comportamiento del tipo pseudoplástico. En cuanto al índice de consistencia  $K$ , la pectina comercial presentó una menor viscosidad que las pectinas obtenidas de manzanas almacenadas en atmosferas controladas ( $p < 0.05$ ). El índice de consistencia de las pectinas aumentó de manera casi lineal hasta los 60 días en almacenamiento y disminuyó de manera significativa ( $p < 0.05$ ) después de 90 días y así se mantuvo hasta los 120 días de almacenamiento en atmósferas controladas. Finalmente, las pectinas extraídas de manzanas almacenadas en atmósferas controladas durante 150 días presentaron el mayor índice de consistencia, indicando una mayor viscosidad.

Cuando las pectinas se extrajeron a partir de manzanas almacenadas a temperatura ambiente y se compararon con la pectina comercial y la pectina de manzanas al momento de la cosecha (Cuadro 15), el comportamiento de flujo siguió siendo del tipo pseudoplástico ( $n < 1$ ). El índice de consistencia fue menor para la pectina comercial. La pectina extraída de manzanas almacenadas a temperatura ambiente durante 30 días (P30TA) presentó un mayor índice de consistencia comparada con la pectina comercial (PCOM) y la pectina extraída de manzanas almacenadas al tiempo a temperatura ambiente (P167DDPF = P0TA) ( $p < 0.05$ ). En

el Cuadro 16 se puede apreciar que las dispersiones de pectina mantuvieron un comportamiento del tipo adelgazante al corte, en el cual el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) osciló entre 0.6677 y 0.8812. Los valores de  $K$  de las pectinas solubles en diferentes solventes y la pectina comercial no presentaron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ).

Durante el periodo de maduración, los polisacáridos estructurales de las paredes celulares son degradados por los complejos enzimáticos propios del fruto; esta depolimerización promueve que la viscosidad de las dispersiones acuosas de estos carbohidratos degradados disminuya a medida que decrece el peso molecular (Einhorn-Stoll *et al.*, 2014; Happi *et al.*, 2008;). Sin embargo, en el presente trabajo no se observó una relación directa entre el aumento del peso molecular y el incremento en  $K$ . Esto puede deberse a la influencia de otros factores físicos como pueden ser la presencia de azúcares laterales a la cadena o estructura principal los cuales pueden absorber una mayor cantidad de moléculas de agua debido a presencia de grupos  $\text{OH}^-$  que establecen enlaces por puentes de  $\text{H}^+$  (Lira-Ortiz *et al.*, 2014; Sengkhamarn *et al.*, 2010).

El comportamiento del tipo corte adelgazante ya ha sido reportado por otros investigadores en muestras de soluciones de pectina de manzana (Chen *et al.*, 2012) y recientemente Vriesmann y Petkowicz (2013) reportaron el predominio del tipo pseudoplástico a la velocidad de 0 a  $100 \text{ s}^{-1}$  en soluciones de pectinas extraídas de vainas de cacao. Ramos-Aguilar *et al.* (2015) publicaron un estudio reciente donde observaron las características anteriores en comportamientos de flujo de muestras de soluciones pécticas extraídas de chiles (en dos estados de madurez) y sometidos a diferentes tratamientos térmicos (ebullición y asado).

Las propiedades reológicas de las dispersiones pécticas dependen de parámetros estructurales como son la masa molar, la cantidad y distribución de sustituyentes (por ejemplo. éster de metilo, grupos amida y acetilo) y el grado de ramificación (Hwang y Kokini, 1992; Lira-Ortíz *et al.*, 2014; Rolin, 2002; Sengkhampan *et al.*, 2010).

**Cuadro 11. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas cosechadas a diferentes DDPF<sup>1</sup>.**

Pectina <sup>§</sup>	Variables reológicas*		
	$K$ (Pa.s <sup><math>n</math></sup> )	$n$	$R^2$
PCOM <sup>2</sup>	0.0303 ± 0.0009 <sup>c</sup>	0.8812 ± 0.0025 <sup>a</sup>	0.9945 ± 0.0009
P107DDPF	0.0412 ± 0.0012 <sup>a</sup>	0.5811 ± 0.0211 <sup>a</sup>	0.9963 ± 0.0003
P122DDPF	0.0378 ± 0.0003 <sup>ab</sup>	0.7846 ± 0.0034 <sup>a</sup>	0.9959 ± 0.0003
P137DDPF	0.0376 ± 0.0002 <sup>ab</sup>	0.7893 ± 0.0047 <sup>a</sup>	0.9960 ± 0.0008
P152DDPF	0.0236 ± 0.0010 <sup>d</sup>	0.8604 ± 0.0067 <sup>a</sup>	0.9849 ± 0.0008
P167DDPF	0.0355 ± 0.0002 <sup>b</sup>	0.8086 ± 0.0021 <sup>a</sup>	0.9966 ± 0.0000

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>DDPF = Días después de plena floración. <sup>2</sup>PCOM = Pectina comercial. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

**Cuadro 12. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas bajo refrigeración.**

Pectina <sup>§</sup>	Variables reológicas*		
	$K$ (Pa.s <sup><math>n</math></sup> )	$n$	$R^2$
PCOM <sup>1</sup>	0.0303 ± 0.0009 <sup>d</sup>	0.8812 ± 0.0025 <sup>a</sup>	0.9945 ± 0.0010
P0REF (P167DDPF)	0.0355 ± 0.0002 <sup>cd</sup>	0.8086 ± 0.0021 <sup>b</sup>	0.9966 ± 0.0000
P30REF	0.0510 ± 0.0010 <sup>b</sup>	0.8860 ± 0.0043 <sup>a</sup>	0.9977 ± 0.0015
P60REF	0.0582 ± 0.0051 <sup>b</sup>	0.8796 ± 0.0117 <sup>a</sup>	0.9980 ± 0.0009
P90REF	0.0582 ± 0.0028 <sup>b</sup>	0.8607 ± 0.0078 <sup>a</sup>	0.9978 ± 0.0015
P120REF	0.0744 ± 0.0026 <sup>a</sup>	0.8638 ± 0.0070 <sup>a</sup>	0.9971 ± 0.0000
P150REF	0.0471 ± 0.0021 <sup>bc</sup>	0.8625 ± 0.0104 <sup>a</sup>	0.9988 ± 0.0000

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>PCOM = Pectina comercial. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

**Cuadro 13. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas bajo atmosferas controladas.**

Pectina <sup>§</sup>	Variables reológicas*		
	$K$ (Pa.s <sup><math>n</math></sup> )	$n$	$R^2$
PCOM <sup>1</sup>	0.0303 ± 0.0009 <sup>e</sup>	0.8812 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.9945 ± 0.0010
P0AC (P167DDPF)	0.0355 ± 0.0002 <sup>d</sup>	0.8086 ± 0.0002 <sup>b</sup>	0.9966 ± 0.0000
P30AC	0.0569 ± 0.0006 <sup>c</sup>	0.8288 ± 0.0006 <sup>ab</sup>	0.9980 ± 0.0000
P60AC	0.0659 ± 0.0014 <sup>b</sup>	0.8746 ± 0.0014 <sup>a</sup>	0.9997 ± 0.0000
P90AC	0.0551 ± 0.0016 <sup>c</sup>	0.8500 ± 0.0016 <sup>ab</sup>	0.9993 ± 0.0003
P120AC	0.0576 ± 0.0007 <sup>c</sup>	0.8591 ± 0.0007 <sup>ab</sup>	0.9991 ± 0.0000
P150AC	0.0843 ± 0.0013 <sup>a</sup>	0.8772 ± 0.0013 <sup>a</sup>	1.0000 ± 0.0000

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>PCOM = Pectina comercial. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

**Cuadro 14. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir de manzanas almacenadas a temperatura ambiente.**

Pectina <sup>§</sup>	Variables reológicas*		
	$K$ (Pa.s <sup><i>n</i></sup> )	$n$	$R^2$
PCOM <sup>1</sup>	0.0303 ± 0.0009 <sup>d</sup>	0.8812 ± 0.0025 <sup>a</sup>	0.9945 ± 0.0010
P0TA (P167DDPF)	0.0355 ± 0.0002 <sup>c</sup>	0.8086 ± 0.0021 <sup>b</sup>	0.9966 ± 0.0000
P30TA	0.0645 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.8714 ± 0.0044 <sup>a</sup>	0.9997 ± 0.0000
P60TA	0.0546 ± 0.0006 <sup>b</sup>	0.8663 ± 0.0066 <sup>a</sup>	0.9993 ± 0.0000

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>PCOM = Pectina comercial. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

**Cuadro 15. Variables reológicas de la Ley de Potencia (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) de la pectina comercial y pectinas obtenidas a partir del jugo y bagazo.**

Pectina <sup>§</sup>	Variables reológicas*		
	$K$ (Pa.s <sup><math>n</math></sup> )	$n$	$R^2$
PCOM <sup>1</sup>	0.0303 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.8812 ± 0.0025 <sup>a</sup>	0.9945 ± 0.0010
PSA-B	0.0281 ± 0.0010 <sup>a</sup>	0.7708 ± 0.0118 <sup>bc</sup>	0.9570 ± 0.0141
PSQ-B	0.0274 ± 0.0037 <sup>a</sup>	0.8516 ± 0.0231 <sup>ab</sup>	0.9905 ± 0.0011
PSAL-B	0.0276 ± 0.0028 <sup>a</sup>	0.7438 ± 0.0165 <sup>cd</sup>	0.9589 ± 0.0148
PSQ-J	0.0284 ± 0.0048 <sup>a</sup>	0.7868 ± 0.0312 <sup>bc</sup>	0.9754 ± 0.0143
PSAL-J	0.0351 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.6677 ± 0.0023 <sup>d</sup>	0.9362 ± 0.0275

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>PCOM = Pectina comercial. <sup>§</sup>Para la nomenclatura de las pectinas ver el Cuadro 8.

### 5.2.2. Áreas bajo las curvas y porcentaje de histéresis

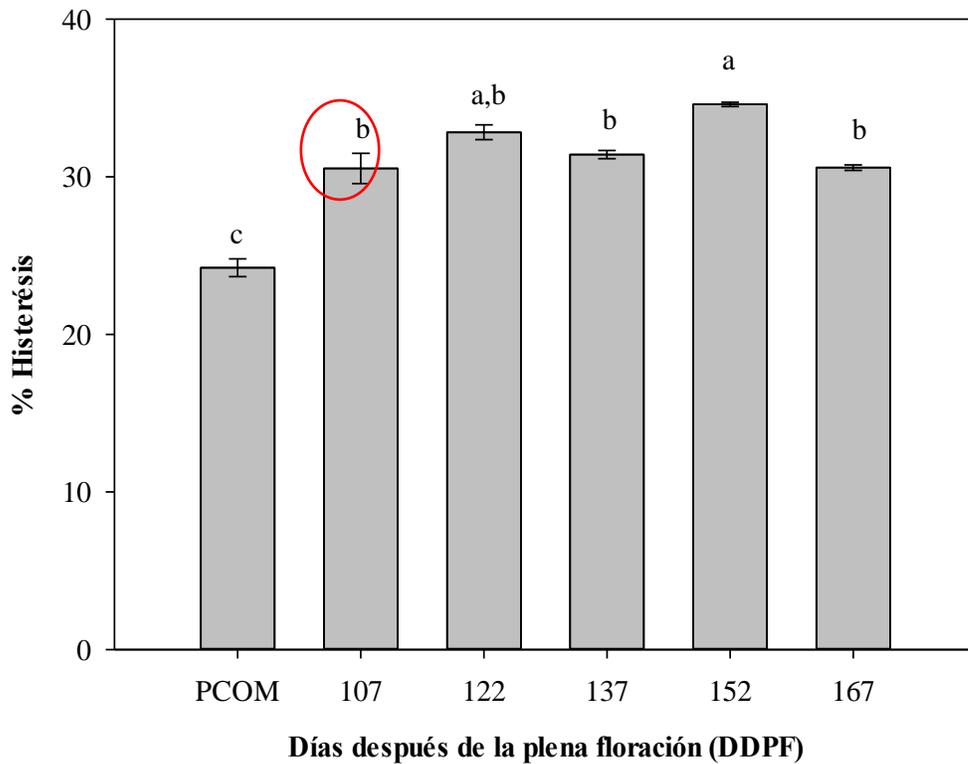
Como se observaron en las curvas de flujo y en los valores de las variables  $K$  y  $n$  (Cuadro 12-16) comportamientos que indicaban desviaciones a la Ley de Newton, se evaluó entonces la dependencia del tiempo en función de barridos ascendentes y descendentes (Cuadro 17) para observar si existía el fenómeno físico de histéresis (separación entre los barridos ascendentes y descendentes). En todas las muestras se observaron valores mayores en los barridos ascendentes (Rampa 1) en comparación con los descendentes (Rampa 2). Por tal razón se procedió a determinar el porcentaje de histéresis (% H) de las pectinas extraídas de manzana agrupadas bajo los diferentes tratamientos, un total de 5 y se compararon con la pectina comercial y el control, exceptuado este último al comparar el % H de las pectinas obtenidas de bagazo. Los valores menores de % H indicaron de cierta manera la mayor estabilidad que pueden tener las pectinas cuando se someten a esfuerzos de cizalla (esfuerzos cortantes) y en función del tiempo que dure la aplicación de este esfuerzo (Barness *et al.*, 1989; Bourne, 2002; Steffe, 1996).

**Cuadro 16. Área bajo la curva del barrido ascendente y descendente de las pectinas\*.**

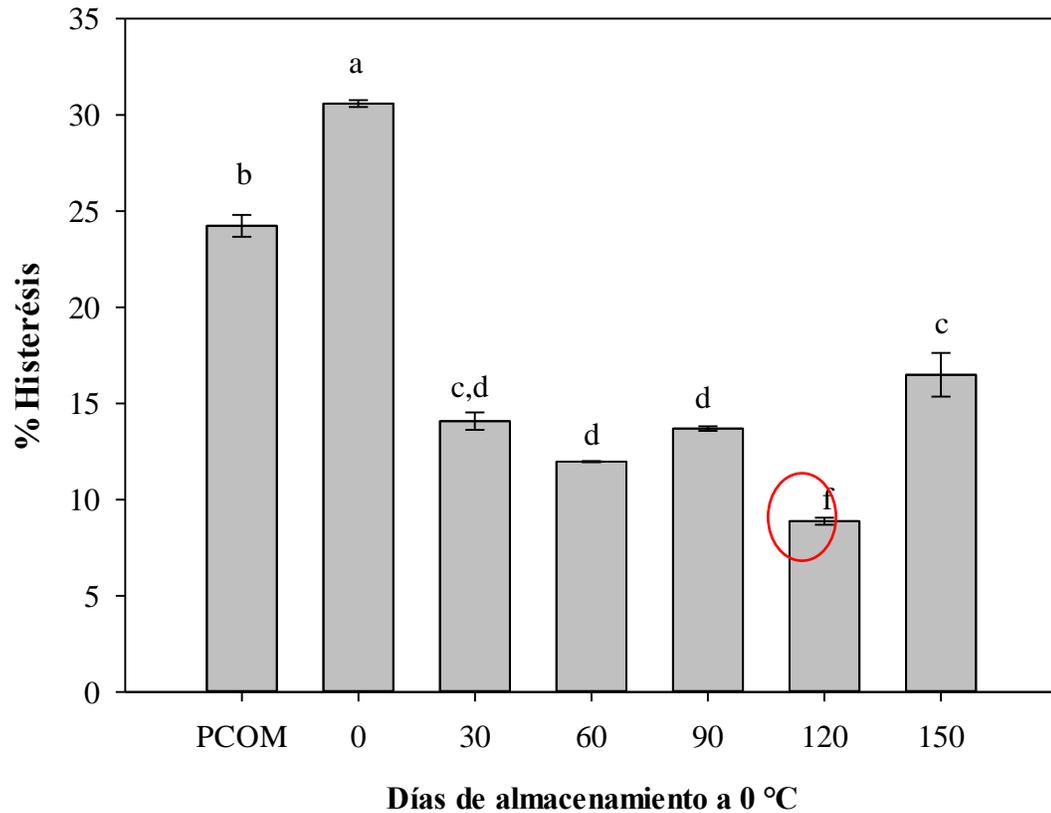
Pectina <sup>1</sup>	Área bajo la curva (Pa.s <sup>-1</sup> )	
	Rampa 1(ascendente)	Rampa 2 (descendente)
PCOM	1706.33 ± 16.18 <sup>g</sup>	1293.00 ± 21.70 <sup>g</sup>
P107DDPF	1318.33 ± 23.67 <sup>gh</sup>	916.23 ± 28.54 <sup>gh</sup>
P122DDPF	1256.33 ± 10.09 <sup>hi</sup>	844.00 ± 12.57 <sup>gh</sup>
P137DDPF	1313.33 ± 4.33 <sup>gh</sup>	900.73 ± 5.80 <sup>gh</sup>
P152DDPF	1209.00 ± 4.36 <sup>hi</sup>	790.73 ± 4.13 <sup>ghi</sup>
P167DDPF	1343.67 ± 3.93 <sup>gh</sup>	932.70 ± 5.05 <sup>gh</sup>
P30REF	2971.67 ± 13.86 <sup>cd</sup>	2553.33 ± 25.18 <sup>cde</sup>
P60REF	3342.00 ± 24.27 <sup>bc</sup>	2941.67 ± 20.53 <sup>bcd</sup>
P90REF	2894.33 ± 6.64 <sup>de</sup>	2498.00 ± 9.07 <sup>de</sup>
P120REF	3652.33 ± 23.41 <sup>b</sup>	3328.00 ± 27.47 <sup>b</sup>
P150REF	2477.67 ± 84.86 <sup>ef</sup>	20.71 ± 98.00 <sup>ef</sup>
P30AC	2348.00 ± 9.07 <sup>i</sup>	1970.00 ± 8.50 <sup>i</sup>
P60AC	3482.67 ± 46.77 <sup>b</sup>	3127.00 ± 53.38 <sup>b</sup>
P90AC	2764.67 ± 280.59 <sup>def</sup>	2324.00 ± 346.97 <sup>ef</sup>
P120AC	2845.33 ± 42.17 <sup>de</sup>	2458.33 ± 46.19 <sup>def</sup>
P150AC	4730.67 ± 234.64 <sup>a</sup>	4300.00 ± 247.23 <sup>a</sup>
P30TA	3406.00 ± 9.87 <sup>bc</sup>	3026.00 ± 22.91 <sup>bc</sup>
P60TA	2778.00 ± 52.46 <sup>def</sup>	2393.33 ± 63.18 <sup>ef</sup>
PSA-B	867.47 ± 1.04 <sup>ij</sup>	446.30 ± 2.74 <sup>hij</sup>
PSQ-B	1292.00 ± 5.86 <sup>ghi</sup>	875.53 ± 7.63 <sup>gh</sup>
PSAL-B	744.20 ± 1.36 <sup>j</sup>	322.50 ± 5.46 <sup>ij</sup>
PSQ-J	936.73 ± 6.12 <sup>hij</sup>	516.10 ± 1.45 <sup>hij</sup>
PSAL-J	627.97 ± 6.72 <sup>j</sup>	196.73 ± 1.98 <sup>j</sup>

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). <sup>1</sup>Para las condiciones de extracción y la nomenclatura utilizada ver Cuadro 8.

Los resultados de esta determinación se observan en las Figuras 4-8. En estas Figuras se indicaron en círculos rojos las pectinas que presentaron una mayor estabilidad para ser utilizadas en su aplicación directa en la salsa. Las pectinas seleccionadas fueron pectinas P107DDPF (pectina extraída de manzanas cosechadas a los 107 días después de la plena floración), P120REF (pectina extraída de manzanas almacenadas durante 120 días a REF), P150AC (pectina extraída de manzanas almacenadas durante 150 días en atmósfera controlada), P30TA (pectina extraída de manzana almacenadas durante 30 días a temperatura ambiente), y PSQ-B (Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de puré). En este sentido, es importante aclarar que además del criterio anterior para la selección de las pectinas en la evaluación reológicas de la salsa se estableció que era importante analizar el efecto de los diferentes grupos de pectinas, ya que pertenecían a manzanas que se sometieron a diversos tratamientos físicos (ver Cuadro 8).



**Figura 4. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzana cosechadas a diferentes DDPF y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa.**



**Figura 5. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas en refrigeración y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa.**

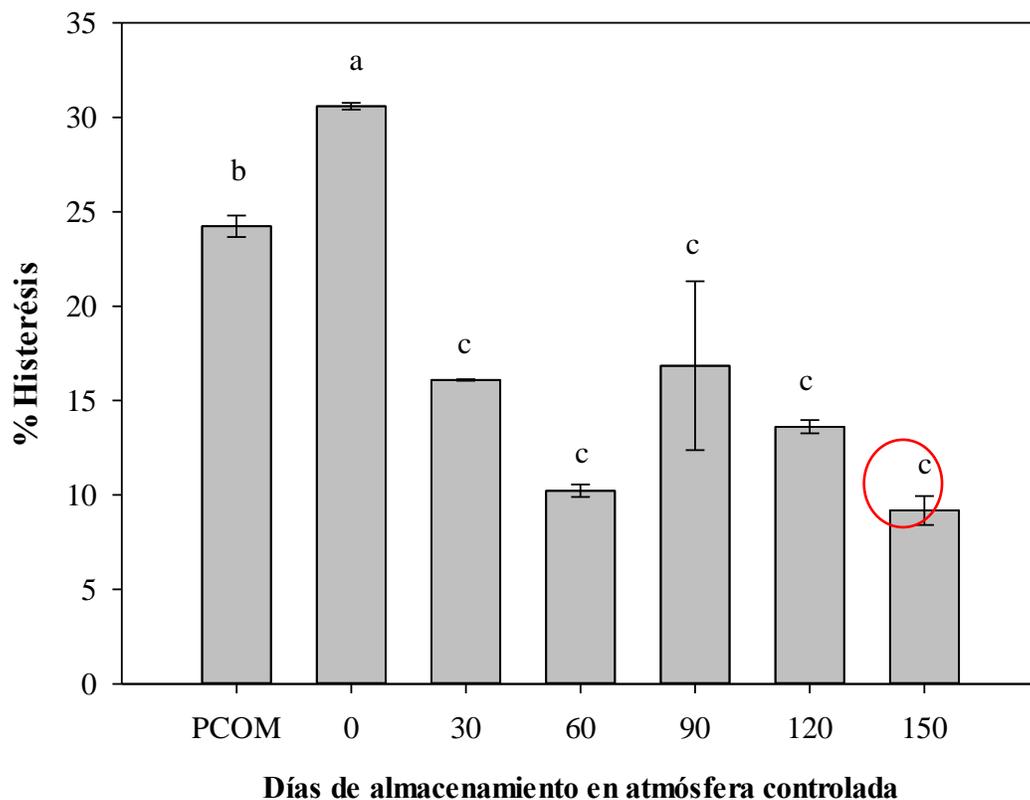
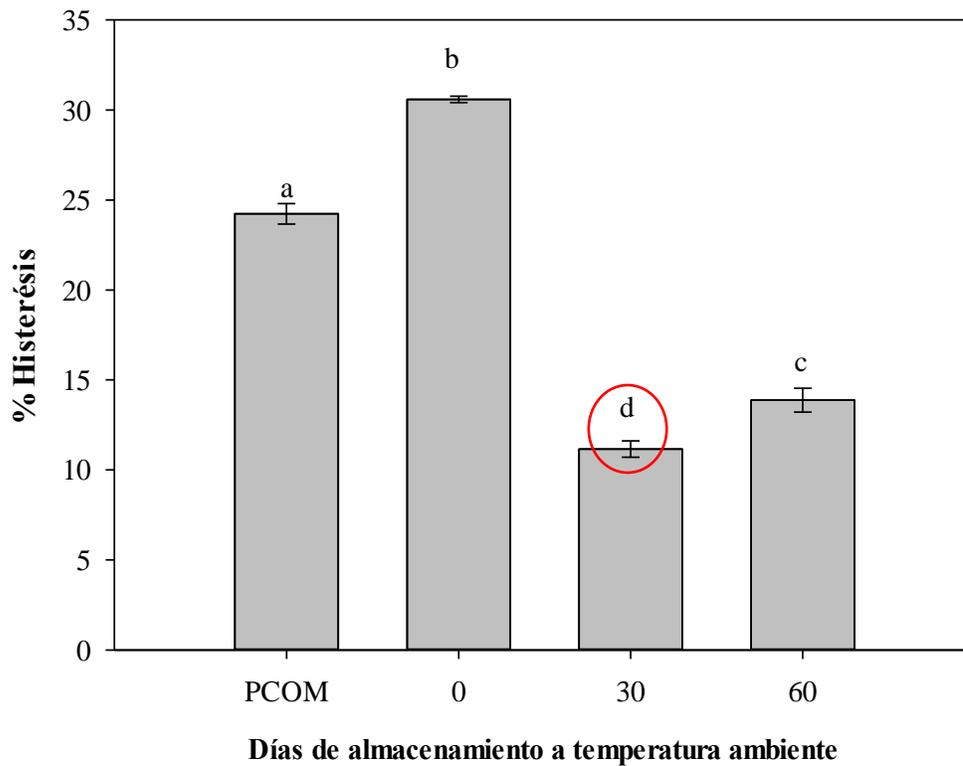
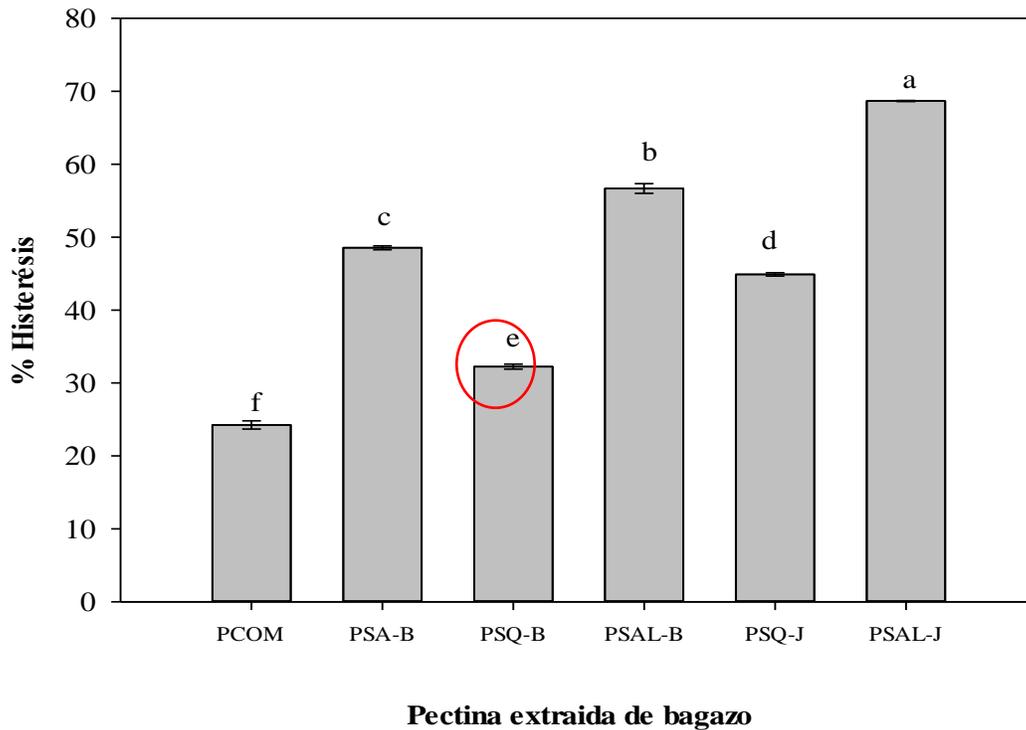


Figura 6. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas en atmósfera controlada y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa.



**Figura 7. Porcentaje de histéresis de las pectinas de manzanas almacenadas a temperatura ambiente y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). La pectina marcada con el círculo rojo se seleccionó para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa.**



**Figura 8. Porcentaje de histéresis de las pectinas de bagazo y jugo extraídas en diferentes solventes y la pectina comercial (PCOM). Media aritmética de al menos tres repeticiones  $\pm$  barra de error estándar. Valores con letras iguales no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ). Las pectinas marcadas con el círculo rojo se seleccionaron para la evaluación en el sistema alimenticio tipo salsa. PSA-B = Pectina soluble en agua extraída del bagazo de puré; PSQ-B = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de puré; PSAL-B = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de puré; PSQ-J = Pectina soluble en agente quelante extraída del bagazo de jugo; PSAL-J = Pectina soluble en agente alcalino extraída del bagazo de jugo.**

### 5.2.3. Evaluación reológica de la salsa con pectinas

Como se puede apreciar en la imagen de la Figura 9, la salsa control presentó una separación de las fases acuosas atribuida a la inmiscibilidad de algunos ingredientes utilizados en su elaboración. Esta separación fue inmediata y no dependió del tiempo, la temperatura y la humedad relativa (HR). Por tal razón, se evaluaron las propiedades reológicas de la salsa control con pectina comercial y con las pectinas definidas 107DDPF, P120REF, P150AC, P30TA y PSQ-B. La evaluación consistió en valorar nuevamente por medio del modelo de Ley de Potencia las variables de índice de consistencia ( $K$ ), índice de comportamiento de flujo ( $n$ ), la bondad del ajuste ( $R^2$ ) y el porcentaje de incremento en la viscosidad determinado en función de  $\Delta K$  como una variable relacionada directamente con la viscosidad aparente al adicionarle la pectina a la muestra de salsa control (Cuadro 18).

Los resultados mostraron que cuando se adicionaron las pectinas a la salsa control se observaron diferencias en las variables  $n$  y  $K$  con valores  $n < 1$  y valores  $K$  superiores a la salsa control. Todos los valores  $n$  de las salsas con las diferentes pectinas fueron menores a al valor control ( $n = 0.56$ ) indicando un comportamiento no-Newtoniano del tipo corte adelgazante (pseudoplástico). Sin embargo, el valor  $K$  incrementó con la adición de las pectinas (incluyendo la pectina comercial). Estos incrementos ( $\Delta K$ ) fueron desde un 29.5 % (salsa con pectina PSQ-B) hasta un valor de 69.3 % (P107DDPF). Con estos resultados obtuvimos el siguiente patrón de comportamiento ascendente del valor  $K$ : Salsa con pectina PSQ-B < Salsa con pectina 120REF < Salsa con pectina comercial < Salsa con pectina P30TA < Salsa con pectina P150AC < Salsa con pectina 107DDPF.



**Figura 9. Fotografías de la salsa control recién elaborada. Almacenada a condiciones de refrigeración (6 °C y 28 % HR, a y b) y a temperatura ambiente (24 °C y 40 % HR, c y d).**

**Cuadro 17. Comparación de las variables reológicas (índice de consistencia =  $K$ , índice de comportamiento de flujo =  $n$ , y bondad del ajuste =  $R^2$ ) y el incremento de la salsa control con las diferentes muestras de pectinas obtenidas por el modelo de Ley de Potencia.**

Muestra	$K$ (Pa s <sup><math>n</math></sup> )	$n$	$R^2$	$\Delta K$ (%)
Salsa control	0.0510 ± 0.0006 <sup>b</sup>	0.5554 ± 0.0020 <sup>a</sup>	0.9831	-
Salsa con pectina comercial	0.0809 ± 0.0031 <sup>d</sup>	0.5138 ± 0.0070 <sup>b</sup>	0.9831	36.95
Salsa con pectina P120REF	0.0788 ± 0.0018 <sup>c</sup>	0.4995 ± 0.0050 <sup>c</sup>	0.9821	35.27
Salsa con pectina P30TA	0.0340 ± 0.0080 <sup>a</sup>	0.5586 ± 0.0050 <sup>d</sup>	0.9924	48.01
Salsa con pectina P150AC	0.1419 ± 0.0080 <sup>e</sup>	0.4347 ± 0.0061 <sup>e</sup>	0.9803	64.05
Salsa con pectina P107DDPF	0.1661 ± 0.0039 <sup>f</sup>	0.4313 ± 0.0002 <sup>e</sup>	0.9821	69.29
Salsa con pectina PSQ-B	0.0723 ± 0.0031 <sup>c</sup>	0.5090 ± 0.0034 <sup>b</sup>	0.9836	29.46

\*Media aritmética de al menos tres repeticiones ± error estándar. Promedios con letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

En la literatura científica son escasos los estudios en donde se hallan evaluado las variables reológicas  $n$  y  $K$  en sistemas alimenticios similares. Gamonpilas *et al.* (2011) reportaron valores  $n$  desde 0.31 hasta 0.42 y  $K$  de 4.53 hasta 22.82 Pa s<sup>n</sup> en muestras de salsas comerciales de Chile. Estos valores son similares en  $n$  aunque los valores  $K$  reportados por estos investigadores son dos órdenes de magnitud mayores que los reportados en nuestro estudio. Sin embargo Gamonpilas *et al.* (2011) utilizaron el modelo reológico de Herschel-Bulkley el cual además, determina el esfuerzo de cedencia y las muestras analizadas por estos investigadores presentaron dentro de sus ingredientes almidón y goma de xantana, por lo cual ellos concluyeron que la mezcla de estos biopolímeros (almidón/goma de xantana) podrían ser benéficos en incrementar la viscosidad y la estabilidad debido a que pueden interactuar de manera sinérgica en condiciones ácidas e incrementar las características del gel y el comportamiento corte adelgazante de las salsas de Chile.

En términos concretos, nuestros resultados de evaluación reológica de la salsa con la adición de pectinas puntualizaron que las pectinas obtenidas en este estudio son comparables a los valores  $K$  que pueden proporcionar las pectinas comerciales. Lo anterior abre una factible aplicación potencial directa de estas pectinas en este tipo de alimentos.

## VII. CONCLUSIONES

Las propiedades fisicoquímicas de color, grado de metil-esterificación y peso molecular indicaron que el método de obtención así como las condiciones físicas del fruto del cual se extrajeron las pectinas afectaron de manera significativa las propiedades reológicas.

Las variables reológicas de las pectinas evaluadas mediante el modelo de Ley de Potencia, el cálculo de su porcentaje de histéresis y el pertenecer a diferentes condiciones de extracción nos permitieron seleccionar a las pectinas P120REF, P150AC, P30TA, P107DDPF y PSQ-B como las más idóneas para utilizarse en el sistema alimenticio tipo salsa.

La adición de estas pectinas en la salsa control mostró que pueden ser comparables e incluso superiores en el incremento de consistencia (viscosidad) en comparación con los valores otorgados por una pectina comercial.

El potencial de aplicación directo en sistemas alimenticios tipo salsa de estas pectinas abre una oportunidad de mercado en el empleo de estos polisacáridos obtenidos de fuentes regionales como la manzana y sugiere realizar más estudios para valorar su estabilidad en otros sistemas alimenticios.

## VIII. IDENTIFICACIÓN DE APLICACIONES TECNOLÓGICAS POTENCIALES

En base a la literatura científica, y considerando los resultados obtenidos en esta investigación se visualizan las siguientes aplicaciones tecnológicas potenciales:

- 1) Las pectinas seleccionadas por su menor porcentaje de histéresis (P107DDPF, P120REF, P150AC, P30TA, y PSQ-B) encontrarían una aplicación directa en los sistemas alimenticios tipo salsas debido a que ayudarían a mantener por un mayor tiempo la separación de las fases acuosas y lipídicas.
- 2) Las pectinas con un valor de índice de consistencia mayor ( $K > 0.04 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ) como son pectinas P107DDPF, P30REF, P60REF, P90REF, P120REF, P150REF, P30AC, P60AC, P90AC, P120AC, P150AC, P30TA, y P60TA, podrían utilizarse en alimentos en donde se requiere impartir una consistencia ó viscosidad alta en cantidades bajas de pectinas, como pueden ser mermeladas, ates y jaleas (Acosta *et al.*, 2006; Bekkour *et al.*, 2014; Guichard *et al.*, 1991).
- 3) Las pectinas con un valor de índice de consistencia intermedio ( $0.03 < K < 0.04 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ; pectinas P122DDPF, P137DDPF, P167DDPF, P0REF, P0AC, P30TA) podrían emplearse en alimentos que requieren un cierto grado de textura y viscosidad como son algunos tipos de yogurt con frutas (Lourens-Hattingh y Viljoen, 2001; Sandoval-Castilla *et al.*, 2010), y en yogurts con bajo

contenido calórico (Krasaekoopt *et al.*, 2003; Krzeminski *et al.*, 2014; Picot y Lacroix, 2004; Sandoval-Castilla *et al.*, 2004).

- 4) Las pectinas con un índice de consistencia bajo ( $K < 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ; pectinas P152DDPF, PSA-B, PSQ-B, y PSQ-J) encontrarían una adecuada aplicación tecnológica en formulaciones como empaques, películas y cubiertas biodegradables para alimentos, debido a que ahí se requieren bajos valores de viscosidad para formar homogéneamente una matriz estructural (Bayarri *et al.*, 2013; Galus y Lenart, 2013; Medeiros *et al.*, 2012; Pérez Espitia *et al.*, 2014) y en la fabricación de biomateriales como sistemas de entrega o excipientes de fármacos para tratamientos de algunas enfermedades como el cáncer de colon (Almeida *et al.*, 2015; Mishra *et al.*, 2008; Moreira *et al.*, 2014; Souto-Maior, *et al.*, 2010).

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, O., Viquez, F., Cubero, E. and Morales, I. Ingredient levels optimization and nutritional evaluation of a low-calorie blackberry (*Robus irasuensis* Liebm.) jelly. *Journal of Food Science*. 71: S390-S394.
- Ahmed, A. and Labavitch, J. M. 1977. A simplified method for accurate determination of cell wall uronide content. *Journal of Food Biochemistry*. 1: 361-365.
- Almeida, E. A. M. S., Facchi, S. P., Martins, A. F., Nocchi, S., Schuquel, I. T. A., Nakamura, C. V., Rubira, A. F. and Muniz, E. C. 2015. Synthesis and characterization of pectin derivative with antitumor property against Caco-2 colon cancer cells. *Carbohydrate Polymers*. 115: 139-145.
- Álvarez-Parrilla, E., de la Rosa, L., Amarowicz, R. and Shahidi, F. 2012. Protective effect of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers against food lipid and human LDL cholesterol oxidation. *Food Chemistry*. 133: 827-834.
- Anónimo. 2014. <https://url?q=http://articulos.infojardin.com>. [Disponible en línea]. Consultado el 15 de Abril de 2014.
- Atmodjo, M. A., Hao, Z. and Mohnen, D. 2013. Evolving views of pectin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*. 64: 747-779.
- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D. and Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*. 48: 410-427.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. and Walters, K. 1989. *An Introduction of Rheology*. Elsevier, New York, NY, USA.

- Bayarri, M., Oulahal, N., Degraeve, P. and Gharsallaoui, A. 2014. Properties of lysozyme/low methoxyl (LM) pectin complexes for antimicrobial edible food packaging. *Journal of Food Engineering*. 131: 18-25.
- Bekkour, K., Sun-Waterhouse, D. and Wadhwa, S. S. 2014. Rheological properties and cloud point of aqueous carboxymethyl cellulose dispersions as modified by high or low methoxyl pectin. *Food Research International*. 66: 247-256.
- Bourne, M. 2002. *Food texture and viscosity. Concept and measurement*. Second Edition. Academic Press, New York, USA. Pp. 427.
- Candogan, K. and Kolsarici, N. 2003. The effects of carrageenan and pectin on some quality characteristics of low-fat beef frankfurters. *Meat Science*. 64: 199-206.
- Canteri, M. H., Ramos, H. C., Wasczynskyj, N. and Wosiacki, G. 2005. Extraction of pectin from apple pomace. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 48: 259-266.
- Chen, H. -B., Chiou, B. -S., Wang, Y. -Z., and Schiraldi, D. A. 2013. Biodegradable pectin/clay aerogels. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 5: 1715-1721.
- Chang-Sheng Chen, Di Zhang, Ya-Qiang Wang, Peng-Min Li and Feng-Wang Ma. 2012. Effects of fruit bagging on the contents of phenolic compounds in the peel and flesh of 'Golden Delicious', 'Red Delicious', and 'Royal Gala' apples. 142: 68-73
- Chen, J., Liang, R. -H., Liu, W., Liu, C. -M., Li, T., Tu, Z. -C. and Wan, J. 2012. Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism. *Food Hydrocolloids*. 28: 121-129.
- Constela, A., Ponce, G. and Lozano, J. E. 2002. Effect of pomace drying on Apple pectin. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*. 35: 216-221.

- Contreras-Esquivel, J. C., Hours, R. A., Aguilar, C. N., Reyes-Vega, M. L. and Romero, J. 1997. Revisión: Extracción microbiológica y enzimática de pectina. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 47: 208-216.
- Delgado-Pelayo, R., Gallardo-Guerrero, L. and Hornero-Méndez, D. 2014. Chlorophyll and carotenoid pigments in the peel and flesh of commercial apple fruit varieties. Food Research International. 65: 272-281.
- Devia, J. E. 2003. Proceso para producir pectinas críticas. Revista Universidad EAFIT. 129: 21-30.
- Draye, M. and Van Cutsem, P. 2008. Pectin methylesterases induce an abrupt increase of acidic pectin during strawberry fruit ripening. Journal of Plant Physiology. 165: 1152–1160.
- Einhorn-Stoll, U., Kastner, H. and Drusch, S. 2014. Thermally induced degradation of citrus pectins during storage—Alterations in molecular structure, colour and thermal analysis. Food Hydrocolloids. 35: 565–575.
- Facultad de Zootecnia. 2007. Alianza para el Campo Sistema Productos. Universidad Autónoma del Estado de Chihuahua.
- FAOSTAT. 2012. Food and Agricultural Organization Statistics. <http://faostat.fao.org>. [Disponible en línea]. Consultado el 20 de Abril de 2014.
- Filisetti-Cozzi, T. M. C. C. and Cárpita, N. C. 1991. Measurement of uronic acids without interfere nee from neutral sugars. Analitical Biochemistry. 197: 157-162.
- Fischer, M. and Amado, R. 1994. Changes in the pectic substances of apples during development and postharvest ripening. Part 1: Analysis of the alcohol-insoluble residue. Carbohydrate Polymers 25: 161-166.

- Fishman, M. L. and Cooke, P. H. 2009. The structure of high-methoxyl sugar acid gels of citrus pectin as determined by AFM. *Carbohydrate Research*. 344: 1792-1797.
- Gallego, H., Alvarez, C., Velez, C. and Fernandez, A. 2012. Caracterización reológica de dos salsas alimenticias. *Vitae*. 19: S433-S435.
- Galus, S. and Lenart, A. 2013. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*. 115: 459-465.
- Garna, H., Mabon, N., Wathelet, B. and Paquot, M. 2004. New method for a two-step hydrolysis and chromatographic analysis of pectin neutral sugar chains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 52: 4652–4659.
- Glinsky, V. V. and Raz, A. 2009. Modified citrus pectin anti-metastatic properties: One bullet, multiple targets. *Carbohydrate Research*. 344: 1788-1791.
- Goulao, L. F., Santos, J., Sousa, I. and Oliveira, M. 2007. Patterns of enzymatic activity of cell wall-modifying enzymes during growth and ripening of apples. *Postharvest Biology and Technology*. 43: 307–318.
- Guichard, E., Issanchou, S., Descourvieres, A. and Etievant, P. 1991. Pectin concentration, molecular weight and degree of esterification: Influence of volatile composition and sensory characteristics of strawberry jam. *Journal of Food Science*. 56: 1621-1627.
- Happi, E. T., Robert, C., Ronkart, S. N., Wathelet, B. and Paquot, M. (2008). Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties. *Bioresource Technology*. 99: 4346–4354.

- Hernández-Lucas, M. J. 2001. Reología y Textura. Curso de Hidrocoloides. Facultad de Física. Universidad de Valencia, España.
- Huber, D. 1983. Polyuronide degradation and hemicellulose modifications in ripening tomato fruit. *American Society of Horticultural Science*. 108: 405-409.
- Hwang, J. and Kokini, J. L. 1992. Contribution of the side branches to rheological properties of pectins. *Carbohydrate Polymers*. 19: 41-50.
- Infoagro. 2014. Frutas tradicionales: Manzanas. [http://www.infoagro.com/frutas\\_tradicionales/manzana.htm](http://www.infoagro.com/frutas_tradicionales/manzana.htm). [Disponible en línea]. Consultado el 25 de Abril de 2014.
- Inforjardin. 2014. Frutales de manzana. Artículos y Fichas. [www.inforjardin.com](http://www.inforjardin.com). [Disponible en línea]. Consultado el 25 de Abril de 2014.
- Khanizadeh, S., Fan, L., Fang, C. Q., Charles, M. T. and Tao, S. 2014. Effect of production systems on phenolic compositions of strawberry fruits. *Acta Horticulturae*. 1049: 513-516.
- Klein, J. D. 1994. Time, temperature, and calcium interact in scald reduction and firmness retention in heated apples. *HortScience*. 29: 194-195.
- Koubala, B. B., Kansci, G., Mbome, L. I. C., Crépeau, M. J., Thibault, J. F. and Ralet, M. C. 2008. Effect of extraction conditions on some physicochemical characteristics of pectins from “*Amélioreé*” and “*Mango*” mango peels. *Food Hydrocolloids*. 22: 1345-1351.
- Krasaekoopt, W., Bhandari, B. and Deeth, H. 2003. Evaluation of encapsulation techniques of probiotics for yoghurt. *International Dairy Journal*. 13: 3-13.

- Krogell, J., Korotkova, E., Er, A., Nen, K., Pranovich, A., Salmi, T., Murzin, D. and Willf, O. R. S. 2013. Intensification of hemicellulose hot-water extraction from spruce wood in a batch extractor –effects of wood particle size. *Bioresource Technology*. 143: 212-220.
- Krzeminski, A., Prell, K. A., Busch-Stockfish, M., Weiss, J. and Hinrichs, J. 2014. Whey protein-pectin complexes as new texturizing elements in fat-reduced yogurt systems. *International Dairy Journal*. 36: 118-127.
- Kumar, A. and Chauhan, G. S. 2010. Extraction and characterization of pectin from apple pomace and its evaluation as lipase (steapsin) inhibitor. *Carbohydrate Polymers*. 82: 454-459.
- Laurent, M. A. and Boulenguer, P. 2003. Comparison of the stabilization mechanism of acid drinks (ADD) induced by pectin and soluble soybean polysaccharide (SSP). In: *Advances in pectin and pectinase research*. Voragen, A. G. J. *et al.* (Eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Alemania. Pp. 467-480.
- Lira-Ortiz, A. L., Reséndiz-Vega, F., Ríos-Leal, E., Contreras-Esquivel, J. C., Chavarría-Hernández, N., Vargas-Torres, A. and Rodríguez-Hernández, A. I. 2014. Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar “Reyna”): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*. 37: 93-99.
- Liu, L., Kerry, J. F. and Kerry, J. P. 2007. Application and assessment of extruded edible casings manufactured from pectin and gelatin/sodium alginate blends for use with breakfast pork sausage. *Meat Science*. 75: 196-202.
- Lourens-Hattingh, A. and Viljoen, B. C. 2001. Yoghurt as probiotic carrier food. *International Dairy Journal*. 11: 1-7.

- Medeiros, B. G. de S., Pinheiro, A. C., Carneiro-da-Cunha, M. G. and Vicente, A. A. 2012. Development and characterization of a nanomultilayer coating of pectin and chitosan –Evaluation of its gas barrier properties and application on “Tommy Atkins” mangoes. *Journal of Food Engineering*. 110: 457-464.
- Minjares-Fuentes, R., Femenia, A., Garau, M. C., Meza-Velázquez, J. A., Simal, S. and Roselló, C. 2014. Ultrasound-assisted extraction of pectins from grape pomace using citric acid: A response surface methodology approach. *Carbohydrate Polymers*. 106: 179-189.
- Mishra, R. K., Datt, M., Pal, K. and Banthia, A. K. 2008. Preparation and characterization of amidated pectin based hydrogels for drug delivery system. *Journal of Materials Science –Materials in Medicine*. 19: 2275-2280.
- Monhen, D. 2008. Pectin structure and biosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*. 11: 266-277.
- Moreira, R. B., Teixeira, J. A., Furuyama-Lima, A. M., de Souza, N. C. and Siqueira, A. B. 2014. Preparation, characterization and evaluation of drug-delivery systems: Pectins and mefenamic acid films. *Thermochimica Acta*. 590: 100-106.
- Núñez-Santiago, M. C., Méndez-Montealvo, M. G. and Solorza-Feria, J. 2001. *Introducción a la reología*. Instituto Politécnico Nacional. México, D. F. Pp. 91.
- Ochoa Ballesteros, F. 2012. *Caracterización reológica de alimentos revisión*. Industrias Químicas Saint Germain, LTDA.
- Otoni, C. G., de Moura, M. R., Aouada, F. A., Camilloto, G. P., Cruz, R. S., Lorevice, M. V., Soares, N. de F. F. and Mattoso, L. H. C. 2014. Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin/papaya puree/cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films. *Food Hydrocolloids*. 41: 188-194.

- Palomo, G. I., Yuri, S. J. A., Moore-Carrasco, R., Quilodrán, P. A. and Neira E. A. 2010. El consumo de manzanas contribuye a prevenir el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y cáncer: Antecedentes epidemiológicos y mecanismos de acción. *Revista Chilena de Nutrición*. 37: 377-385.
- Patist, A. and Bates, D. 2011. Industrial applications of high power ultrasonics. In: *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Feng, H., Barbosa-Cánovas, G. V. and Weiss, J. (Eds.). Springer. New York, USA. Pp. 599-616.
- Peña, M. J. and Cárpita, N. C. 2004. Loss of highly branched arabinans and debranching of rhamnogalacturonan 1 accompany loss of firm texture and cell separation during prolonged storage of apple. *Plant Physiology*. 135: 1305–1313.
- Pérez Espitia, P. J., Avena-Bustillos, R. J., Du, W. –X., Teófilo, R. F., Soares, N. F. F. and McHugh, T. H. 2014. Optimal antimicrobial formulation and physical-mechanical properties of edible films based on açai and pectin for food preservation. *Food Packaging and Shelf Life*. 2: 38-49.
- Picot, A. and Lacroix, C. 2004. Encapsulation of bifidobacteria in whey protein-based microcapsules and survival in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. *International Dairy Journal*. 15: 505-515.
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A. and Chemat, F. 2013. Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. *Food Control*. 31: 593-606.
- Ptichkina, N. M., Markina, O. A. and Romyantseva, G. N. 2014. Pectin extraction from pumpkin with the aid of microbial enzymes. *Food Hydrocolloids*. 22: 192-195.
- Qiu, N. –X., Tian, Y. –X., Qiao, S. –T. and Deng, H. 2009. Apple pectin behavior separated by ultrafiltration. *Agricultural Sciences in China*. 8: 1193-1202.

- Ramos-Aguilar, O. P., Ornelas-Paz, J. de J., Ruiz-Cruz, S., Zamudio-Flores, P. B., Cervantes-Paz, B., Gardea-Béjar, A. A., Pérez-Martínez, J. D., Ibarra-Junquera, V. and Reyes-Hernández, J. 2015. Effect of ripening and heat processing on the physicochemical and rheological properties of pepper pectins. *Carbohydrate Polymers*. 115: 112-121.
- Redgwell, R. J., Fisher, M., Kendal, E. and MacRae, E. A. 1997. Galactose loss and fruit ripening: High-molecular-weight arabinogalactans in the pectin polysaccharides of fruit cell walls. *Planta*. 203: 174–181.
- Ren, C. and Kermode, A. 2000. An increase in pectin methyl esterase activity accompanies dormancy breakage and germination of yellow cedar seeds. *Plant Physiology*. 124: 231-242.
- Renard, C. M. G. C., Lemeunier, C. and Thibault, J. F. 1995. Alkaline extraction of xyloglucan from depectinised apple pomace: Optimisation and characterization. *Carbohydrate Polymers*. 28: 209-216.
- Rolin, C. 2002. Commercial pectin preparations. In G. B. Seymour and J. P. Knox (Eds.). *Pectins and their manipulation*. Blackwell Publishing, CRC, Florida. Pp. 222-241.
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E. and Vernon-Carter, J. E. 2004. Microstructure and texture of yoghurt as influenced by fat replacers. *International Dairy Journal*. 14: 151-159.
- Sandoval-Castilla, O., Lobato-Calleros, C., García-Galingo, H. S., Alvarez-Ramírez, J. and Vernon-Carter, E. J. 2010. Textural properties of alginate-pectin beads and survivability of entrapped *Lb. casei* in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt. *Food Research International*. 43: 111-117.

- Sato, M. D. F., Rigoni, D. C., Canteri, M. H. G., Petkowicz, C. L. D. O., Nogueira, A. and Wosiacki, G. 2011. Chemical and instrumental characterization of pectin from dried pomace of eleven apple cultivars. *Acta Scientiarum Agronomy*. 33(3): 383-389.
- Schwartz, S. E., Levine, R. A., Weinstock, R. S., Petokas, S., Mills, C. A. and Thomas, F. 1988. Sustained pectin ingestion: Effect on gastric emptying and glucose tolerance in non-insulin-dependent diabetic patients. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 48: 1413-1417.
- Sengkhampan, N., Sagis, L. M. C., de Vries, R., Schols, H. A., Sajjaanantakul, T. and Voragen, A. G. J. 2010. Physicochemical properties of pectins from okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench). *Food Hydrocolloids*. 24: 35-41.
- Shalini, R. and Gupta, D. K. 2010. Utilization of pomace from apple processing industries: A review. *Journal of Food Science and Technology*. 47: 365-371.
- SIAP. 2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx). [Disponible en línea]. Consultado el 20 de Abril y el 2 de Mayo de 2014.
- Siddiqui, S., Brackmann, A., Streif J. and Bangerth, F. 1996. Controlled atmosphere storage of apples: Cell wall composition and fruit softening. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 71: 613-620.
- Souto-Maior, J. F. A., Reis, A. V., Pedreiro, L. N. and Cavalcanti, O. A. 2010. Phosphated crosslinked pectin as a potential excipient for specific drug delivery: Preparation and physicochemical characterization. *Polymer International*. 59: 127-135.

- Srivastava, P. and Malviya, R. 2011. Sources of pectins, extraction and its applications in pharmaceutical industry—an overview. *Indian Journal of Natural Products and Resources*. 2: 10-18.
- Steffe, J. F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Second Edition. Freeman Press, USA.
- Sun, S. Li Xina, Huajun Gao, Jiangyong Wang and Pengmin Li. 2014. Response of phenolic compounds in 'Golden Delicious' and 'Red Delicious' apples peel to fruit bagging and subsequent sunlight re-exposure. *Scientia Horticulturae* 168: 161–167.
- Ueno, H., Tanaka, M., Hosino, M., Sasaki, M. and Goto, M. 2008. Extraction of valuable compounds from the flavedo of *Citrus junos* using subcritical water. *Separation and Purification Technology*. 62: 513-516.
- Voragen, F. G. J., Timmers, J. P. J., Linssen, J. P. H., Schols, H. A. and Pilnik, W. 1983. Methods of analysis for cell-wall polysaccharides of fruit and vegetables. *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und –Forschung*. 177: 251-256.
- Vriesmann, L. C. and Petkowicz, L. O. 2013. Highly acetylated pectin from cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.) forms gel. *Food Hydrocolloids*. 33: 58-65.
- Vriesmann, L. C., Silveira, J. L. M. and Petkowicz, C. L. de O. 2010. Rheological behavior of a pectic fraction from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*). *Carbohydrate Polymers*. 79: 312-317.
- Walpole, R. E., Myers, R. H. and Myers, S. L. 1999. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. 6a. Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, México.
- Wang, X. and Lu, X. 2014. Characterization of pectic polysaccharides extracted from apple pomace by hot-compressed water. *Carbohydrate Polymers*. 102: 174-184.

- Weiss, J., Gibis, M., Schuh, V. and Salminen, H. 2010. Advances in ingredient and processing systems for meat products. *Meat Science*. 86: 196-213.
- Willats, W. G. T., Knox, J. P. and Mikkelsen, J. D. 2006. Pectin: New insights into and old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science and Technology*. 17: 97-104.
- Xu, Y., Zhang, L., Bailina, Y., Ge, Z., Ding, T., Ye, X. and Liu, D. 2014. Effects of ultrasound and/or heating on the extraction of pectin from grapefruit peel. *Journal of Food Engineering*. 126: 72-81.
- Yapo, B. M. 2009. Lemon juice improves the extractability and quality characteristics of pectin from yellow passion fruit by-product as compared with commercial citric acid extractant. *Bioresource Technology*. 100: 3147-3151.
- Ye, H., Wang, K., Zhou, C., Liu, J. and Zeng, X. 2008. Purification, antitumor and antioxidant activities in vitro of polysaccharides from the brown seaweed *Sargassum pallidum*. *Food Chemistry*. 111: 428-432.
- Yoshioka, H., Aoba, K. and Kashimura, Y. 1992. Molecular weight and degree of methoxylation cell wall polyuronide during softening in pear and apple fruit. *Journal of American Society of Horticultural Science*. 117: 600-606.
- Zhang, L., Ye, X., Ding, T., Sun, X., Xu, Y. and Liu, D. 2013. Ultrasound effects on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin. *Ultrasonics Sonochemistry*. 20: 222-231.