



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS  
BIODEGRADABLES A BASE DE NOPAL VERDURA  
(*Opuntia ficus-indica*).**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**MARÍA CONCEPCIÓN FERRAES FERIA**



**MÉXICO, D.F.**

**2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** PROFESOR: ADELA CASTILLEJOS SALAZAR

**VOCAL:** PROFESOR: JOSÉ LUZ GONZÁLEZ CHÁVEZ

**SECRETARIO:** PROFESOR: JUAN CARLOS GUEVARA ARAUZA

**1ER. SUPLENTE:** PROFESOR: MARÍA DEL PILAR CAÑIZARES MACIAS

**2° SUPLENTE:** PROFESOR: MARÍA GUADALUPE LEMUS BARAJAS

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE FITOQUÍMICOS Y BIOPRODUCTOS, FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS,  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**DR. JUAN CARLOS GUEVARA ARAUZA**

---

**SUSTENTANTE:**

**MARÍA CONCEPCIÓN FERRAES FERIA**

---

## AGRADECIMIENTOS

Unas cuantas líneas son insuficientes para expresar todo lo que he recibido de ti, mi amada Facultad de Química; ésta es mi forma de agradecer que me cobijaste durante la etapa más importante de mi vida, porque gracias a eso, se orientó el rumbo que hoy día he seguido. En ti viví: sacrificios, alegrías, derrotas y decepciones; fue un camino lleno de arduo esfuerzo, constancia y circunstancias que me hicieron mantener mis ideales. Hoy cumplo mi compromiso contigo y debo agradecer a quienes me acompañaron en este objetivo y de igual manera a quienes detrás de él, me acompañaron de manera solidaria consciente o inconscientemente.

Gracias al creador por la vida, por todas las bendiciones y sobre todo, por las enseñanzas que me ha brindado.

Gracias a mis padres por ser el receptáculo por el cual se dio lo anterior; a ti padre, Sergio<sup>†</sup>, por darme bases sólidas y por soltar mis alas desde muy joven para emprender el vuelo de manera independiente y por extenderme tu mano cuando lo viste necesario, éste es mi mayor legado. A ti madre, Rosa, por enseñarme, a tu manera, a ser fuerte para lograr un objetivo.

Gracias a Antonio, Lilia, Ezequiel, Elena y David, por la unión que mantuvimos para salir adelante, por toda su ayuda y apoyo y, aunque hoy las circunstancias nos separen, siempre nos unirá ese lazo inseparable.

A Daniel y Daniela, gracias, porque aunque nuestro caminar no ha sido fácil ni sencillo, me han acompañado y dado la oportunidad de retomar este compromiso y gracias por comprender que esto es parte de la superación de todo ser humano.

A mis maestros, gracias, por todas sus enseñanzas profesionales y personales. En especial, a la Directora Adela Castillejos Salazar y al Doctor José Luz González por su orientación y apoyo en la presentación de la tesis, gracias.

A todos mis amigos y amigas, gracias, en particular a Ruth por ayudarme y apoyarme en especial con éste objetivo, a Laura e Adriana, por animarme en todo momento.

A mis compañeros(as), gracias porque en algún momento fueron parte de las circunstancias que me aportaron muchas enseñanzas.

Gracias a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y a la Secretaría de Investigación y Posgrado de UASLP por el apoyo otorgado a la presente.

Y muy especialmente a mi asesor el Doctor Juan Carlos Guevara, por darme la oportunidad y la fortaleza para retomar este sendero y poder así cumplir con este compromiso. Gracias por la paciencia, la tolerancia, la confianza y por todo el tiempo que invirtió en este proyecto, gracias por su apoyo incondicional y sobre todo por la enseñanza de vida, ha guiado, invaluablemente, esta parte de mi vida con admiración y respeto.

## DEDICATORIAS

A Brenda Daniela, por que éste sea un ejemplo de que todo esfuerzo, finalmente, es recompensado, que la vida esta llena de objetivos y que es importante creer en uno mismo y dedicar todo su empeño para conseguirlos, esa es una decisión que cada quien debe de tomar sólo, por convicción. Éste, también es un ejemplo de que, independientemente de las decisiones que tomemos, no estamos solos en la vida, también hay que reconocer que detrás de cada sueño hay quienes te apoyan, creen, te animan y comparten tu felicidad.

Al Doctor Juan Carlos Guevara, porque detrás de este sueño, me apoyó, creyó y me animó a culminar con este objetivo, porque orientó mi camino hacia el conocimiento y la superación profesional compartiendo su pensamiento positivo, este logro también le pertenece.

## CONTENIDO

Índice General	vi
Índice de imágenes	viii
Índice de tablas	x
	Pág.
I. Introducción	1
1.1. Hipótesis	5
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos particulares	5
II. Marco teórico	6
2.1. Generación y deposición de residuos sólidos	6
2.1.1. Generación de residuos sólidos en México y el mundo	6
2.1.2. Necesidades de la industria	13
2.2. Plásticos	14
2.2.1. Conceptos	14
2.2.2. Propiedades de las películas degradables	18
2.2.2.1. Propiedades ópticas	18
2.2.2.2. Propiedades mecánicas	19
2.2.2.3. Propiedades de barrera	19
2.2.2.4. Degradabilidad	19
2.2.3. Materiales plásticos para empaque de uso frecuente	21
2.2.4. Biopolímeros en el uso de empaques	23
2.3. El Nopal	26
2.3.1. Ícono de nuestra patria	26
2.3.2. Origen y especies	28
2.3.3. Descripción	30
2.3.4. Composición química	31
2.3.5. Sistema de producción	33

2.3.6. Biomacromoléculas del nopal	35
2.3.6.1. Pectina	35
2.3.6.2. Mucílago	39
III. Metodología	41
3.1 Extracción y caracterización de los polímeros del nopal	43
3.1.1. Método de extracción del mucílago	43
3.1.2. Método de extracción de la pectina	45
3.1.3. Caracterización del mucílago y la pectina	48
3.2. Diseño y caracterización de las películas	50
3.2.1. Elaboración de las películas a base de nopal	50
3.2.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas	51
3.2.2.1. Espesor	51
3.2.2.2. Densidad	51
3.2.2.3. Color	51
3.2.2.4. Humedad	52
3.2.3. Determinación de las propiedades mecánicas	52
3.2.4. Determinación de las propiedades de barrera (permeabilidad) a O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y vapor de H <sub>2</sub> O	53
3.2.5. Evaluación de las propiedades térmicas	53
3.2.6. Prueba de degradabilidad	54
IV. Resultados y discusión	56
4.1. Composición química y distribución de peso molecular	56
4.2. Propiedades físicas	59
4.3. Propiedades mecánicas	62
4.4. Permeabilidad a los gases	63
4.5. Propiedades térmicas	64
4.6. Degradabilidad	65
V. Conclusiones	69
VI. Referencias bibliográficas	72



6.1. Bibliografía	72
6.2. Hemerografía	73
6.3. Mesografía	76

<b>Índice de imágenes</b>	Pág.
Gráfica 1. Generación estimada de RSU	7
Gráfica 2. Composición de RSU, 2009	8
Gráfica 3. Generación de Residuos Urbanos a nivel mundial	8
Gráfica 4. Generación per cápita de RSU por países	9
Gráfica 5. Reciclaje de RSU por su composición, 2008	10
Gráfica 6. Disposición de residuos, 2006	11
Gráfica 7. Consumo de los principales plásticos en México	12
Gráfica 8. Consumo de los principales plásticos para la fabricación de embalaje	13
Gráfica 9. Composición química de los biopolímeros de nopal	57
Gráfica 10. Composición de los azúcares neutros de los biopolímeros	58
Gráfica 11. Distribución de la masa molecular de los biopolímeros	59
Gráfica 12. Representación del color de las películas de nopal	60
Gráfica 13. Evaluación de la biodegradación de las películas de nopal	66
Gráfica 14. Proceso de biodegradación de las películas de nopal	67
Figura 1. Representación de polímeros de acuerdo con su estructura	15
Figura 2. Representación del estado cristalino de un polímero	16
Figura 3. Transiciones térmicas en los polímeros	16
Figura 4. Representación del oráculo de los aztecas	26
Figura 5. <i>Códice Techialoyan García Granados</i>	27
Figura 6. Especie <i>Opuntia ficus indica</i>	28
Figura 7. Especie <i>Opuntia nopalea</i>	28

Figura 8. Distribución de las especies de nopal en México	29
Figura 9. Estructura de la pectina	36
Figura 10. Esquema de la gelificación de pectina de bajo grado metil- esterificación	37
Figura 11. Estructura de los polisacáridos del mucílago de nopal	40
Figura 12. Plan de trabajo para la elaboración de las películas de nopal	42
Figura 13. Muestras base para la extracción del mucílago	43
Figura 14. Mucílago precipitado y liofilizador	44
Figura 15. Muestras de pectina centrifugada	45
Figura 16. Pectina liofilizada para su posterior análisis	46
Figura 17. Proceso de extracción de pectina de nopal	47
Figura 18. Disolución de residuos de muestras hidrolizadas de biopolímero	48
Figura 19. Equipo para la determinación de masa molecular de los biopolímeros	50
Figura 20. Películas obtenidas de las dispersiones, a) mucílago y b) pectina	50
Figura 21. Referencia para la determinación del espesor de las películas	51
Figura 22. Equipo utilizado para obtener las curvas de deformación vs tensión	52
Figura 23. Calorímetro diferencial de barrido utilizado para la determinación de Tg, Tm y sus entalpías	54
Figura 24. Película biodegradable elaborada a base de mucílago	61
Figura 25. Película elaborada a base de pectina	61

## Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de residuos generados por el envasado	9
Tabla 2. Disposición de RSU a nivel mundial	11
Tabla 3. Agentes externos que provocan degradación	20
Tabla 4. Poliolefinas más usadas en el empaque de alimentos	22
Tabla 5. Fuentes de los biopolímeros	23
Tabla 6. Biopolímeros para la producción de películas y recubrimientos	24
Tabla 7. Composición química del nopal variedad <i>O. cv Milpa Alta</i>	32
Tabla 8. Principales estados productores de nopal	33
Tabla 9. Aprovechamiento del nopal por sectores	34
Tabla 10. Caracterización química y física del mucílago y pectina de nopales cv. Milpa Alta	56
Tabla 11. Características fisicoquímicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal	60
Tabla 12. Propiedades mecánicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal	63
Tabla 13. Permeabilidad a los gases de películas elaboradas con biopolímeros de nopal	64
Tabla 14. Propiedades térmicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal	65
Tabla 15. Biodegradación de películas a base de polímeros de nopal	66

## **I. Introducción**

La amplia utilización de los polímeros en todos los niveles de desarrollo tecnológico, industrial y social ha ocasionado problemas de contaminación en todo el mundo, en particular por la generación, manejo, disposición y deposición final de residuos sólidos; esto ha originado un gran interés y preocupación con miras a la sostenibilidad y sustentabilidad ambiental. Las agencias gubernamentales de las principales potencias económicas a nivel mundial, han establecido políticas para promover el desarrollo de su bioindustria, en donde uno de los principales campos es la biotecnología vegetal, dentro del cual, se promueve e impulsa el desarrollo y fabricación de películas biodegradables (Guowu Yuan, 2009). Esta tecnología ha sido materia de considerable esfuerzo de investigación acerca del uso de materiales biodegradables basados en polímeros naturales, tales como, las proteínas (extraíbles del amaranto, el quitosano, el surimi, entre otros.) y el almidón (procedente de la papa, el plátano, el arroz, el maíz, etc.), los cuales, son recursos renovables y económicos (Xiao Li, et al., 2010; Dias A., 2010; Nadriadid Jiménez, E., 2009). La idea del uso y la incorporación de aditivos biodegradables dentro de los polímeros inertes fue introducido desde 1973 (Griffin, 1973). Estos estudios plantean una solución para reducir los problemas del manejo de residuos plásticos, sin embargo, es un hecho que las propiedades de los materiales sintéticos son muy difíciles de alcanzar e incluso de superar por los polímeros degradables, de tal forma que, por ahora las propiedades que presentan son similares a las que presentan las películas formuladas con las poliolefinas.

Diversos estudios realizados han demostrado que la fabricación de las películas poliméricas a partir de una mezcla de almidón modificado

(de diversas fuentes naturales) con polietileno, permite generar películas degradables con posible aplicación en el empaqueo de los alimentos (Vargas Torres et al., 2007; 2008).

Compaginado a esto, es evidente que el deterioro del medio ambiente ha generado que en la actualidad se acentúen más los problemas de escasez de agua, por lo que cada vez es mayor la fracción de suelos semiáridos y erosionados; actualmente, se ha puesto especial interés en aquellos cultivos que pueden desarrollarse en este tipo de ambientes, siendo pocas las alternativas de cultivo en estas tierras.

En nuestro país, las zonas áridas y semiáridas representan la mayor parte del territorio, y además, contamos con un cultivo que se encuentra ampliamente distribuido a lo largo de toda la República y a sabiendas de que ha demostrado ser ya, por varios siglos, una fuente natural de sustento y un deleite, no ha tenido un aprovechamiento integral y por ende, un aprovechamiento industrial, evidentemente, se trata del nopal. Sin duda alguna, podría considerarse la principal alternativa; y por si fuera poco, con la ventaja extra de que después del primer cultivo de nopal los suelos quedan restaurados, este factor es importante, debido a que otros cultivos (maíz, frijol, soya, etc.) han generado el empobrecimiento paulatino de los suelos donde se cultivan.

México es el primer productor a nivel mundial de nopal verdura y de tuna (seguido por Italia) y ocupa un no menos decoroso segundo lugar en la producción de nopal forrajero, después de Argentina. Por sus diversas aplicaciones como alimento, planta de ornato y restaurador de suelos, al igual que por sus diversas propiedades biofuncionales (nutracéutico, prebiótico, antioxidante, agente inmunomodulador, etc.) y por sus propiedades medicinales (analgésico, antiinflamatorio, antiviral, diurético, antigástrico, contra la úlcera, dispepsia, daño

hepático, diabetes y arterosclerosis, entre otras.), el cultivo y aprovechamiento del nopal se ha extendido por todo el mundo y se ha utilizado para fabricar una gran variedad de productos por varias industrias, de las cuales sobresalen tres: la de alimentos, la de cosméticos y la farmacéutica (Guevara A., 2009). Sin embargo, al igual que en la mayoría de los productos hortofrutícolas existen reportes que indican pérdidas postcosecha que, para el caso del nopal verdura son mayores a un 50%, debido a las insuficientes e inadecuadas tecnologías aplicadas a este producto; estas cifras son alarmantes, si tomamos en cuenta que las pérdidas precosecha, comercialización y procesamiento no han sido consideradas.

Otra propiedad que presenta el nopal es que, por su morfología, ofrece una alternativa interesante y nuevas oportunidades para el diseño de materiales de empaque eficientes con biopolímeros que tienen características de hidrogel y que podrían extraerse de él; estos materiales son redes hidrófilas tridimensionales de cadenas de polímeros capaces de absorber grandes cantidades de agua, del orden de miles de veces su peso seco. Dentro de éstos, se encuentra la pectina, la cual es una biomacromolécula especialmente prometedora para una amplia gama de aplicaciones industriales actuales y futuras como hidrogel; ésta se ha consolidado como una molécula multifuncional en la industria alimentaria, dado que, su capacidad de gelificación se utiliza ampliamente (Farris et al., 2009). El mucílago de nopal es otra biomacromolécula interesante que a la fecha su estudio ha sido muy limitado, de tal manera que, sus características ofrecen grandes desafíos para explotar al máximo su aprovechamiento.

De manera general, se puede decir que para formular una película destinada a aplicaciones alimentarias y en especial en productos

altamente perecederos, se deben cumplir características tales como, costo, disponibilidad y atributos funcionales, así como, propiedades mecánicas (tensión y flexibilidad), ópticas (brillo y opacidad), de barrera frente al flujo de gases y de resistencia estructural tanto al agua como a los microorganismos. Estas características son influenciadas por parámetros como, el tipo de material implementado, la matriz estructural (conformación, masa molecular, distribución de cargas), las condiciones bajo las cuales se preforman las películas (tipo de solvente, pH, concentración de componentes, temperatura, entre otras.), además, del tipo y concentración de los aditivos (plastificantes, agentes entrecruzantes, antimicrobianos, antioxidantes, emulsificantes, etc.), (Quintero et al., 2010).

En resumen, la responsabilidad social que tenemos con el medio ambiente, de la misma forma que nos compete como profesionistas y como sociedad la problemática que representa la contaminación generada por la acumulación de residuos sólidos en el país; aunado al impulso que se le ha dado a la biotecnología en el desarrollo de biopolímeros procedentes de cultivos que pueden tener un aprovechamiento integral; así como, el reto de desarrollar materiales alternativos que contribuyan en una mejora a corto plazo sin comprometer el mañana, a través de la generación y estudio de biomacromoléculas que una vez transformadas cumplan con las características necesarias para su posible aplicación en el empaque de productos alimenticios, y por el interés personal en la investigación en esta área, fueron elementos básicos para el desarrollo del presente estudio.

## **1.1. Hipótesis**

Es posible generar películas biodegradables formuladas a base de polisacáridos (mucílago y pectina) adecuadas para su posible aplicación en el empaqueo de alimentos en atmósferas modificadas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar películas biodegradables a base de mucílago y pectina de nopal y caracterizarlas en cuanto a sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y de barrera a los gases.

### **1.2.2. Objetivos particulares**

- a. Extraer y caracterizar fisicoquímicamente el mucílago y la pectina de nopal.
- b. Elaborar películas biodegradables a partir de los biopolímeros extraídos del nopal.
- c. Evaluar las propiedades físicas de las películas: color, densidad, espesor y humedad relativa (HR).
- d. Evaluar las propiedades mecánicas de las películas: fuerza de resistencia a la tensión de carga, el porcentaje de elongación al rompimiento (%E) y el módulo elástico (EM).
- e. Evaluar en las películas, las propiedades de barrera a los gases: permeabilidad al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y vapor de H<sub>2</sub>O.
- f. Evaluar las propiedades térmicas: Temperatura de fusión (T<sub>m</sub>), temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) y sus respectivas entalpías.
- g. Realizar pruebas de biodegradabilidad.



## **II. Marco teórico**

### **2.1. Generación y deposición de residuos sólidos**

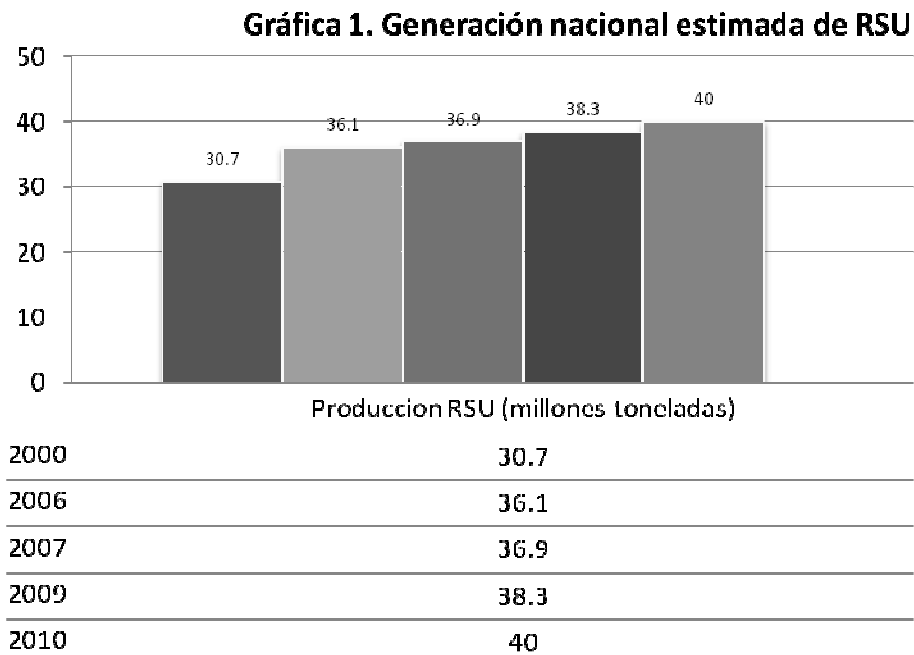
La evolución de la industria plástica derivada del petróleo tuvo gran auge gracias a la relativa facilidad de procesamiento con la que se obtienen los productos y subproductos, así como de presentar un máximo aprovechamiento procedente de su comercialización. Sin embargo, son recursos no renovables y tanto sus residuos como las emisiones atmosféricas que emiten por su combustión son contaminantes.

#### **2.1.1. Generación de residuos sólidos en México y el mundo**

La generación de residuos, tanto urbanos como industriales, se acompaña, inevitablemente, por la inadecuada disposición de ellos a lo largo del territorio, lo que impacta directa o indirectamente a la salud de la población y de los ecosistemas naturales. Por ello, las tendencias de desarrollo y las innovaciones en este campo consideran áreas de investigación a: la bioenergía, los biofertilizantes, las biofibras y los biopolímeros, tomando en cuenta la protección de los recursos y del medio ambiente.

De acuerdo con los datos reportados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la generación nacional de residuos sólidos urbanos (RSU) durante 2010, sobrepasaba los 40 millones de toneladas, esto equivale a una producción diaria de alrededor de 109 000 toneladas, estableciendo una generación per cápita diaria de 0.96 kg/habitante/día, de modo que, anualmente, se estiman en alrededor de los 350 kg/habitante. La Gráfica 1, muestra el

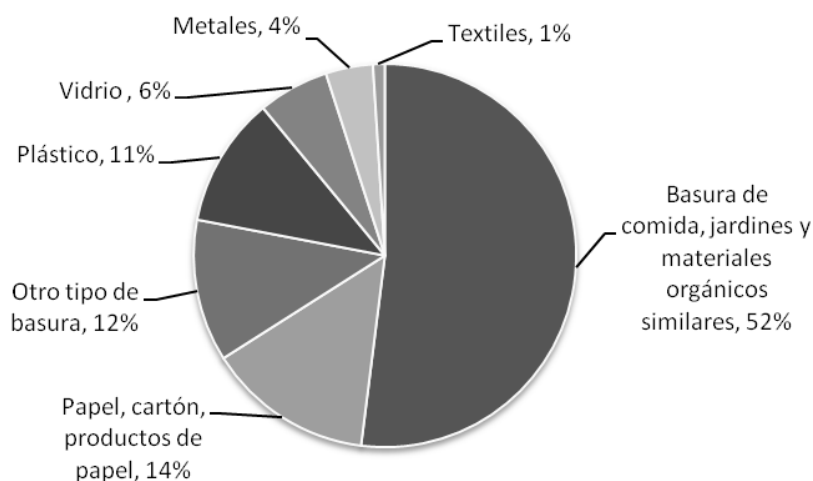
incremento en la generación nacional de RSU que se ha presentado durante este siglo.



Fuente: Elaboración propia con datos de: <http://bitly.com/VLeRPA>

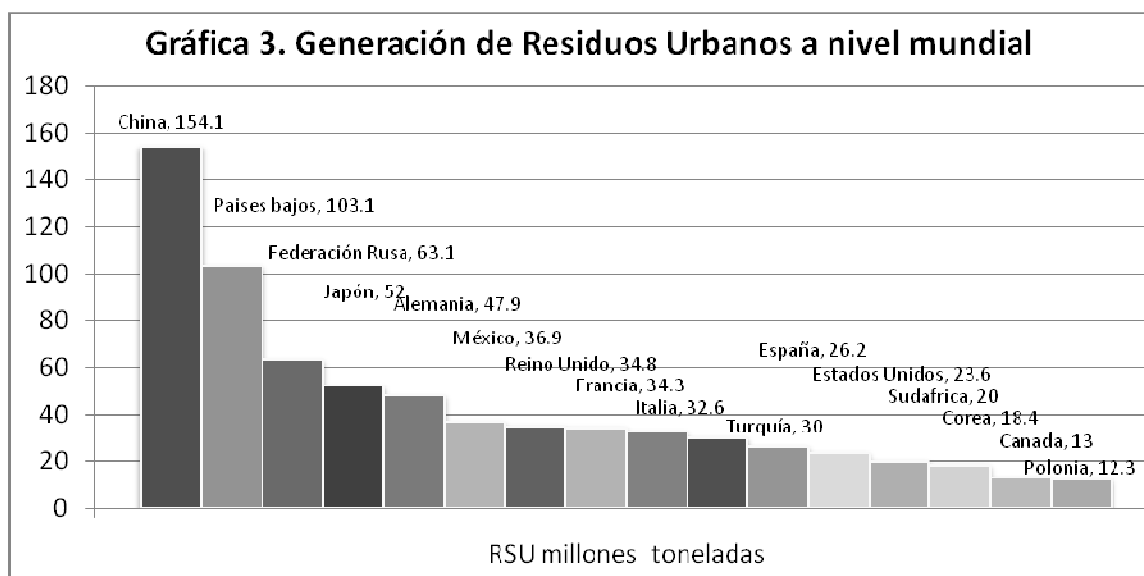
La composición de los RSU, en general, depende de los patrones de consumo de la población, ya que existe una correlación entre la composición y las condiciones económicas de los países: aquellos con menores ingresos generan menos residuos y en sus componentes predomina la materia orgánica, en contraste con los países con mayores ingresos. En el caso de México, en el año 2009, los residuos orgánicos en la basura fueron alrededor de un 52%, de los cuales, el 36% era, potencialmente, reciclable, destacando el papel y cartón (14%), el vidrio (6%), el plástico (11%), el metal (4%) y los textiles (1%), tal como lo muestra la Gráfica 2.

**Gráfica 2. Composición de RSU, 2009**



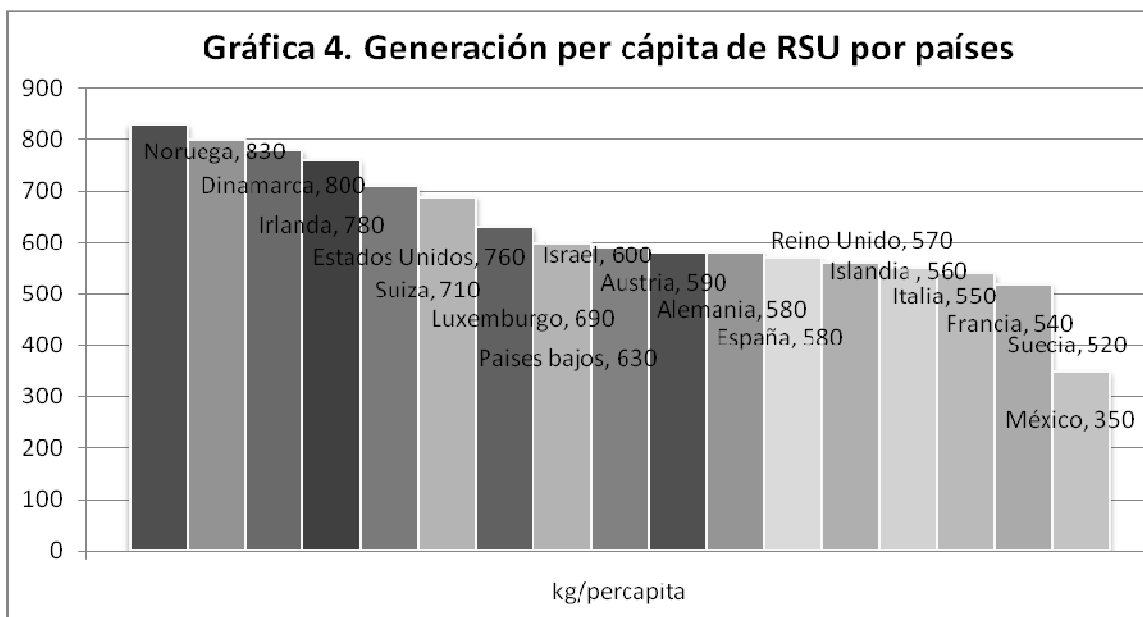
Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT (2009).

A nivel mundial, de acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en el 2007, México se ubicó en la sexta posición de los países que tienen mayor generación de RSU (Gráfica 3).



Fuente: Elaboración propia con datos de OCDE, factbook 2010, estadísticas, residuos urbanos.

Como se puede observar en la Gráfica 4, la generación per cápita nacional de RSU fue de 350 kg/habitante/año, dicha cifra corresponde a valores muy por debajo de los generados en países como Noruega, Dinamarca, Irlanda y Estados Unidos.



Fuente: Elaboración propia con datos de OECD, factbook 2010, estadísticas, residuos urbanos.

Con respecto a la composición de los RSU, la OCDE reporta que dentro de los residuos generados por el envasado se encuentran el papel, el plástico, el vidrio y los metales, los cuales se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Cantidad de residuos generados por el envasado**  
(millones de toneladas)

País	Año	Papel	Plástico	Vidrio	Metales	Total <sup>a</sup>
Estados Unidos	2005	35.4	12.4	9.9	3.8	69.5
Francia	2004	4.3	2.0	3.1	0.7	12.4
Alemania	2004	6.9	2.3	3.0	0.9	6.9
Italia	2005	4.3	2.1	2.1	0.6	11.9
España	2004	3.1	1.4	1.6	0.5	7.4

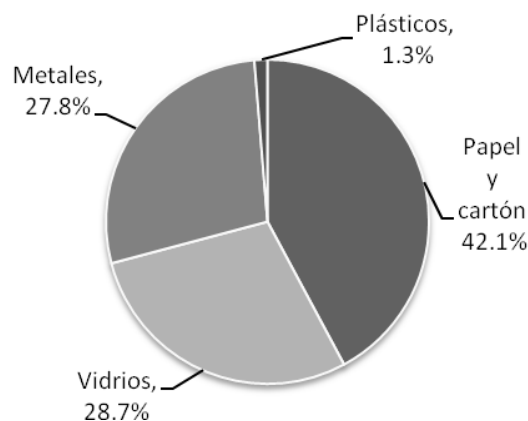
a) El total puede contener otro tipo de materiales, por ejemplo madera.

Fuente: Elaboración propia con datos de OECD, Environmental Data, Compendium 2006-2008.

De acuerdo con la SEMARNAT, el volumen de los RSU que se recicla en el país, es bajo; en el año 2007, se recicló un 3.3% (podría alcanzar el 10%, ya que muchos se recuperan directamente en los contenedores y en los vehículos de recolección), de los cuales el 1.3% corresponde al rubro de plásticos, cifra que se mantuvo invariable en relación al año 2008.

La composición detallada de los RSU se muestra en la Gráfica 5.

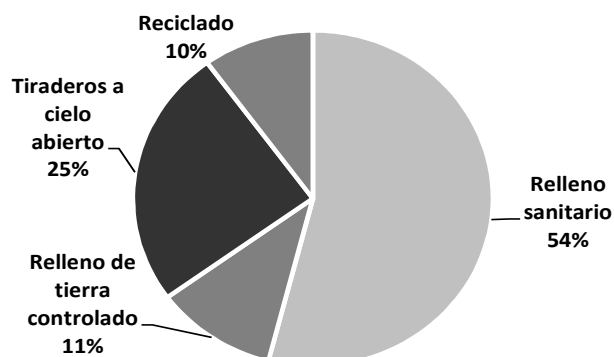
**Gráfica 5. Reciclaje de RSU por su composición, 2008**



Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT. 2009.

En cuanto a la disposición, final en el año 2006, el 65% de los RSU se depositó en rellenos sanitarios y de tierra controlados, como se puede observar en la Gráfica 6. El resto representa focos de infección y fuentes de contaminación al medio ambiente.

**Gráfica 6. Disposición de residuos, 2006**



Fuente: Elaboración propia con datos de la SEMARNAT. 2006.

La disposición de los RSU a nivel mundial, comprende el reciclaje, el compostaje, la incineración con recuperación de energía (en la mayoría de los casos) y el relleno sanitario. La Tabla 2, muestra lo anterior.

**Tabla 2. Disposición de RSU a nivel mundial**

(millones de toneladas)

País	Año	Reciclaje	Compostaje	Incineración	R. Sanitario	Total
E. Unidos	2005	53.0	18.6	30.3	121	223
Francia	2005	5.4	4.9	11.5	12.2	33.9
Alemania	2004	16.0	8.3	11.9	8.5	48.4
Italia	2005	0.0	10.5	3.8	17.2	31.7
España	2004	2.0	7.4	1.5	11.7	22.7
México	2006	1.2	0.0	0.0	34.9	36.0

a) El total puede contener otro tipo de materiales, por ejemplo madera.

Fuente: Elaboración propia con datos de OECD, Environmental Data, Compendium 2006-2008.

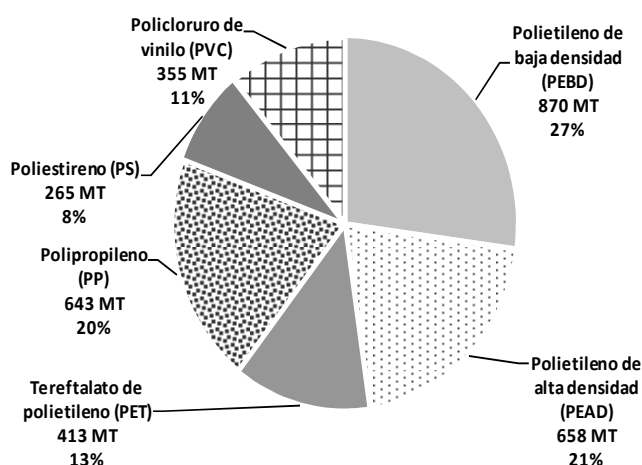
En general, algunos autores (Segura et. al, 2007) reportan que los residuos plásticos están básicamente formados por:

- Polietileno de baja densidad (PEBD)
- Polietileno de alta densidad (PEAD)
- Policloruro de vinilo (PVC)

- Polipropileno (PP)
- Poliestreno (PS)
- Polietilentereftalato (PET)

La Gráfica 7, muestra los datos del consumo de los principales plásticos durante el año 2000, destaca que la industria de los plásticos flexibles en México participa, en la manufactura de envases y embalajes con un consumo total de 3 204 000 toneladas.

**Gráfica 7. Consumo de los principales plásticos en México**

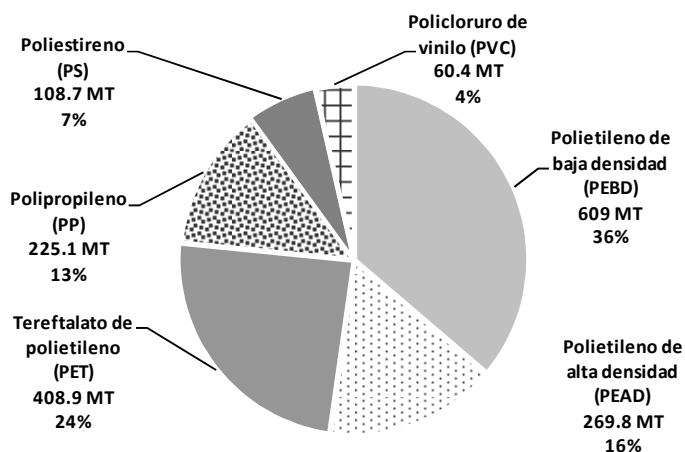


(Tipo de plástico, abreviatura, participación en miles de toneladas, porcentaje de participación)

Fuente: El PET y su situación actual en el Distrito Federal. GDF, Secretaria del Medio Ambiente.

La Asociación para la Promoción de Reciclado de PET (APREPET), menciona que el 52.48% (1 681 000 toneladas) de estos materiales plásticos fueron destinados a la fabricación de embalaje, lo anterior se muestra en la Gráfica 8.

**Gráfica 8. Consumo de los principales plásticos para la fabricación de embalaje**



(Tipo de plástico, abreviatura, participación en miles de toneladas, porcentaje de participación)

Fuente: El PET y su situación actual en el Distrito Federal. GDF, Secretaria del Medio Ambiente.

### 2.1.2. Necesidades de la industria

La problemática generada por el uso indiscriminado de plásticos sintéticos y su persistencia en el ambiente ha estimulado la investigación para el desarrollo de nuevos materiales y métodos de producción que permitan generar plásticos que presenten las mismas propiedades pero que tengan un periodo de degradación más corto (Segura et. al, 2007). La sustitución de los plásticos actuales por plásticos biodegradables es una vía por la cual, se pretende disminuir la presencia de los plásticos sintéticos en el medio ambiente, ya que sus desechos podrían ser tratados como remanentes orgánicos o eliminarlos en los depósitos sanitarios, estimando su eliminación en períodos cortos de tiempo.



## **2.2. Plásticos**

### **2.2.1. Conceptos**

El término plásticos se define como: Cada uno de los materiales cuyo componente esencial es un polímero al que se le ha añadido determinadas proporciones de aditivos (pigmentos, plastificantes, estabilizadores, agentes de curado, etc.)(RAC, 2001).

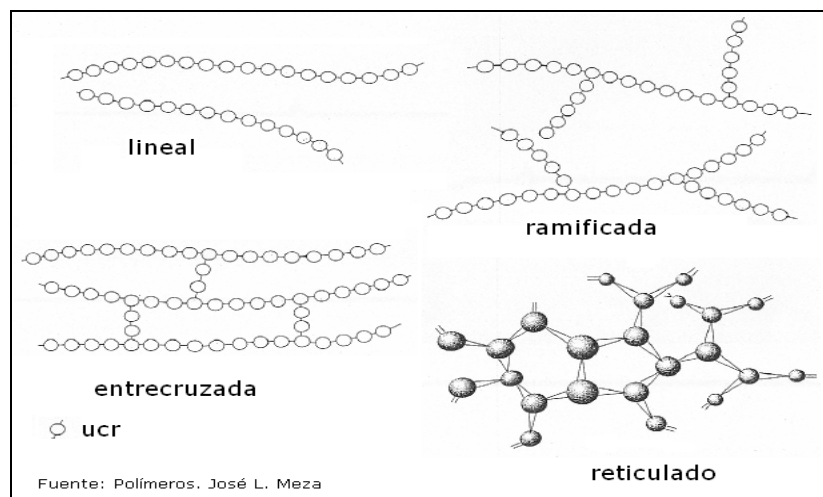
Los aditivos que lo conforman tienen las siguientes funciones: los rellenos mejoran las propiedades físicas y mecánicas, los plastificantes proporcionan mayor flexibilidad, los estabilizadores evitan la degradación química por la luz, el calor, el oxígeno o la humedad, los colorantes mejoran la apariencia y los solidificadores ayudan a endurecer el material.

En un sentido más limitado, los plásticos son polímeros sintéticos que pueden ser derivados del petróleo y otras sustancias naturales; también pueden considerarse los semisintéticos, que resultan de la transformación de los polímeros naturales.

Por definición, un polímero es una sustancia natural o sintética constituida por una molécula de elevado peso molecular (masa molecular), resultante de la unión de moléculas sencillas (monómeros) (RAC, 2001).

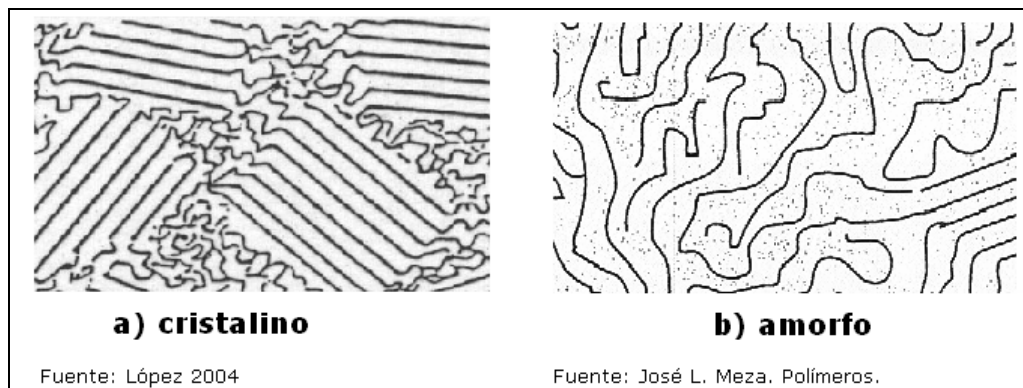
Los polímeros entonces, son macromoléculas formadas por monómeros que se unen entre sí por enlaces covalentes mediante una reacción de polimerización, la cual determina la longitud del polímero (grado de polimerización) y su masa molecular (masa de la unidad constitucional repetitiva [ucr] multiplicada por el grado de polimerización). Generalmente, los polímeros poseen moléculas con

longitudes de cadena diferente, por ello, la distribución de masa molecular se realiza experimentalmente, a fin de obtener un valor promedio, la cual es reportada, por lo general, como peso molecular en Dalton (Da). Estas cadenas pueden agruparse de cuatro formas, ya sea lineal (cadena sencilla), ramificada (cadenas secundarias), entrecruzada (uniones transversales en varias posiciones) o reticulada (redes tridimensionales), estas formaciones se pueden apreciar en la Figura 1.

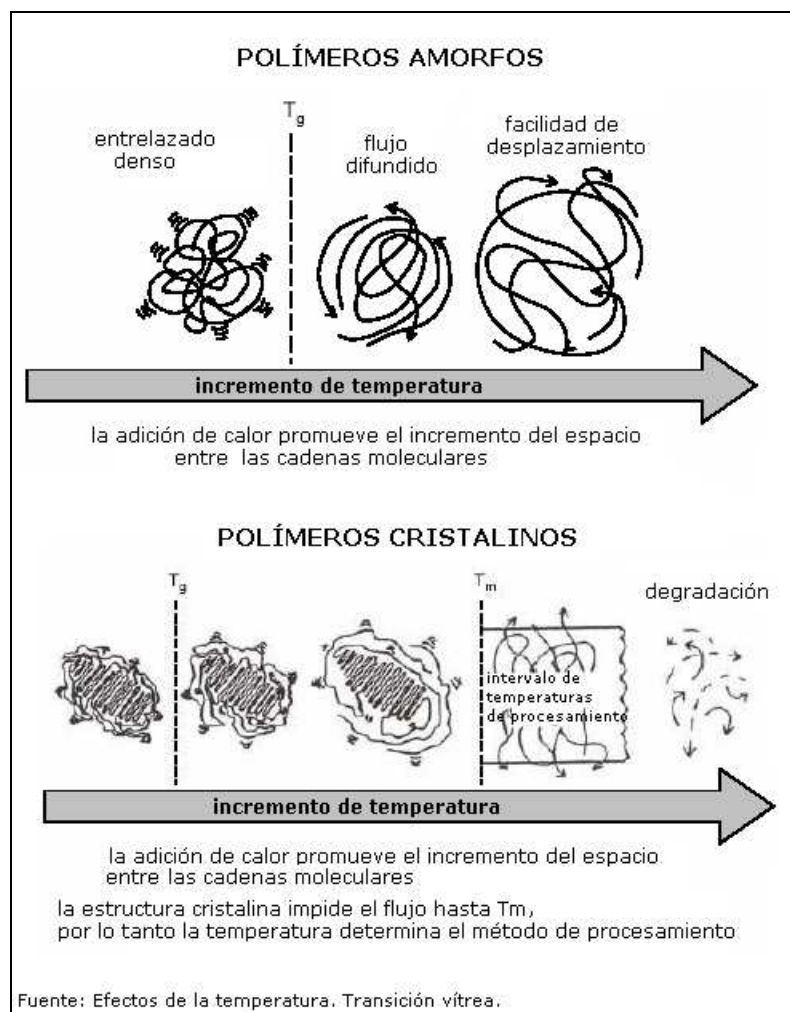


**Figura 1. Representación de polímeros de acuerdo con su estructura**

Los plásticos en general, son materiales de distintas estructuras (Figura 2), que carecen de punto fijo de fusión. A cierto intervalo de temperaturas presentan propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones (MINCETUR, 2009), es decir, el intervalo entre el cual un material puede emplearse, quedará definido por la temperatura de transición cristalina o también llamada de fusión ( $T_m$ ), la cual corresponde al paso de líquido viscoso a sólido cristalino y por la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), que es aquella en donde la región amorfa predomina y presenta propiedades características del vidrio, éstas varían de acuerdo al tipo de material. Este comportamiento puede observarse en la Figura 3.



**Figura 2. Representación del estado cristalino de un polímero**



**Figura 3. Transiciones térmicas en los polímeros**

Las características de los plásticos a temperatura ambiente son diferentes. Los que presentan estructuras rígidas y que al someterlos a un proceso repetible de elevación de la temperatura, se vuelven blandos y moldeables, sin que por ello cambien sus propiedades se denominan termoplásticos, es decir, presentan un proceso reversible y repetible; en su mayoría son polímeros lineales, aunque también hay ramificados con cadenas flexibles; por lo general, presentan bajas temperaturas de fusión y son solubles en disolventes orgánicos, son relativamente blandos y dúctiles. Por otra parte, los termoestables, son materiales rígidos, frágiles y con cierta resistencia térmica. Una vez moldeados no cambian su forma; durante el enfriamiento se convierten en sólidos más rígidos que los polímeros originales, el calentamiento promueve nuevos entrecruzamientos y provoca una mayor resistencia a la fusión. Son duros, resistentes y frágiles, tienen mejor estabilidad dimensional, suelen ser insolubles en disolventes orgánicos y se descomponen a altas temperaturas, por lo general a este grupo pertenecen la mayoría de los reticulados y entrelazados.

Generalmente, los plásticos presentan deformación al aplicarles fuerzas débiles a temperaturas moderadas. El parámetro más usual que determina la resistencia de las películas, es la fuerza a la tracción, es decir, la aplicación de cargas axiales que tienden a estirarlo. La resistencia mecánica se pierde por arriba de la  $T_g$  en el caso de los polímeros amorfos y por encima de la  $T_m$  en el caso de los cristalinos. La elongación elástica, es otro tipo de deformación que indica cuánto puede ser alargada una muestra antes de que se rompa sin sufrir una deformación permanente, ésta se reporta como un porcentaje.

## **2.2.2. Propiedades de las películas degradables**

Las películas son una cubierta de material que, además de mejorar la apariencia del producto, deben presentar varias características deseadas como suavidad, ligereza y transparencia; por otro parte, deben funcionar como una barrera efectiva a la transmisión de gases, vapores y solutos, de igual forma, deben presentar una adecuada degradabilidad. Por lo que es importante definir estas propiedades.

### **2.2.2.1. Propiedades ópticas**

La transparencia en los materiales viene dada por el modo en que se estructuran a nivel molecular; en los materiales cristalinos la luz pasa libremente. Este fenómeno se define como transmitancia, y es la fracción de luz que pasa a través de una muestra, por lo tanto, es la relación entre la intensidad de luz que atraviesa un material y la luz que choca sobre el mismo.

Cuando la luz es reflejada, se puede determinar la reflectancia, que es la relación de las intensidades entre la luz reflejada y la luz incidente. Cuando esta última es reflejada directamente sobre la superficie del material, se tiene una percepción alta del brillo; esto es característico en superficies lisas. Por otro lado, cuando la reflectancia es difusa, es decir, que tiene lugar en todas direcciones, se tiene una percepción de la opacidad y da lugar a un aspecto blancuzco reduciendo su transparencia; esta característica se aprecia en superficies rugosas. En los materiales semicristalinos la refracción de la fase amorfa genera cierta transparencia. Por lo tanto, la opacidad de un material es la incapacidad de transmitir luz.

#### **2.2.2.2. Propiedades de barrera**

La permeabilidad es la propiedad de permitir el paso de fluidos, ya sean gases, vapores o líquidos, a través de una estructura molecular. Se mide por el flujo de gas o líquido que penetra la superficie de la película en condiciones normales o estándar. Ésta puede determinarse tanto para los gases como para el vapor de agua.

La permeabilidad al vapor de agua está en función de lo que se desea, ya sea, proteger el producto contra la humedad del aire o evitar la evaporación de la humedad contenida en él.

Para el caso de la permeabilidad a los gases, la importancia radica en la naturaleza del producto, por ejemplo, para el caso de frutas y hortalizas, debe tomarse en cuenta la actividad respiratoria. En esta determinación será importante el índice de velocidad de transmisión de los gases como: nitrógeno, dióxido de carbono, oxígeno y vapor de agua. Cabe mencionar que esta característica, es particular para cada material.

#### **2.2.2.3. Degradabilidad**

La degradación de los polímeros se refiere a los procesos inducidos por la luz solar, el calor y otros agentes atmosféricos que generan una modificación en la estructura del polímero. Los cambios que pueden presentarse son:

1. Físicos: como decoloración, pérdida de brillo superficial, formación de grietas, superficies untuosas, erosión superficial y pérdida de propiedades como resistencia a la tracción-deformación.

2. Químicos: Se da la ruptura de cadenas, cambios en sustituyentes laterales, reacciones de entrecruzamiento, etc.

En la Tabla 3, se pueden consultar los agentes externos que conducen a la degradación del polímero y el mecanismo por el cual se lleva a cabo la degradación.

**Tabla 3. Agentes externos que provocan degradación**

<b>Agente externo</b>	<b>Tipo de degradación</b>
<b>Luz solar</b>	Fotodegradación
<b>Calor</b>	Degradación térmica
<b>Agentes atmosféricos</b>	Degradación oxidativa
<b>Humedad</b>	Degradación hidrolítica
<b>Hongos y microorganismos</b>	Biodegradación
<b>Luz + oxígeno</b>	Fotodegradación oxidativa
<b>Calor + oxígeno</b>	Degradación termoxidativa
<b>Luz + humedad</b>	Degradación fotohidrolítica

Fuente: Generalidades sobre polímeros

La degradación de los plásticos sintéticos es muy lenta (hasta 500 años), y está directamente correlacionada con la estructura química de los materiales de procedencia. En particular, el tipo de enlace determina el tipo de ataque, ya sea microbiológico o fisicoquímico (Siracusa et al., 2008). De acuerdo con lo reportado por Segura et al (2007), se han desarrollado cuatro tipos de plásticos degradables:

1. Fotodegradables, poseen grupos sensibles a la luz incorporados directamente al esqueleto del polímero. Después de su exposición a la luz ultravioleta en varias semanas o meses, la estructura polimérica puede desintegrarse en una estructura abierta que le

permite ser descompuesta en partículas de plástico más pequeñas, que pueden ser susceptibles de degradación por bacterias. Sin luz, permanece como material no degradable.

2. Semibiodegradables, contienen polisacáridos unidos a fragmentos cortos de polietileno. En los rellenos sanitarios, las bacterias degradan los polisacáridos, liberando el polietileno, el cual permanece como material no degradable.
3. Biodegradables sintéticos, este plástico está basado en polietenol o alcohol polivinílico con estructura parecida al polietileno. La presencia de grupos hidroxilo (-OH) en este polímero lo hacen hidrofílico y, por lo tanto, soluble en agua.
4. Naturales completamente biodegradables, entre los que se encuentran los bioplásticos.

### **2.2.3. Materiales plásticos para empaque de uso frecuente**

Las poliolefinas suministran la mayor parte de los materiales de empaque, debido a sus características como son: suavidad, ligereza y transparencia, buenas propiedades de barrera, resistencia mecánica y al calor, así como rendimiento y bajo costo.

Un empaque debe cumplir con funciones básicas como: contener, conservar, proteger y almacenar, por ello, el producto y el envase deben considerarse como una unidad. Para el caso del uso de películas plásticas aplicadas en alimentos, por lo general, el grosor no debe exceder de 0.254 mm. En la Tabla 4, se resumen algunos de los polímeros más utilizados.



**Tabla 4. Poliolefinas más utilizadas en el empaque de alimentos**

<b>Nombre</b>	<b>Siglas</b>	<b>Características</b>
<b>Polietileno</b>	PE	Es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, se fabrica en finas láminas transparentes. Presenta baja permeabilidad al vapor de agua, elevada permeabilidad a vapores orgánicos y al oxígeno.
<b>Polietileno de Baja Densidad</b>	LDPE	Es un sólido blanco y translúcido, a temperatura ambiente es tenaz y flexible.
<b>Polipropileno</b>	PP	Es un material termoplástico semicristalino, tiene baja densidad, alta dureza, resistencia a la abrasión, alta rigidez, buena resistencia al calor, excelente resistencia química y excelente versatilidad. Es un producto inerte, totalmente reciclable, no produce contaminantes al ser incinerado y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental.
<b>Poliestireno</b>	PS	Puro es un sólido incoloro, rígido, frágil y con flexibilidad limitada. Sus ventajas principales son la facilidad de uso y su costo relativamente bajo. A fin de obtener mayor utilidad se mezcla con algunos cauchos y se obtiene poliestireno de alto impacto (HIPS), otra variación es el poliestireno biorientado (BOPS), el cual presenta excelente cristalinidad y brillo.
<b>Polietilén tereftalato</b>	PET	Sus propiedades únicas le dan considerables ventajas, como: claridad, brillo, transparencia, barrera a los gases o aromas, impacto, termoformabilidad, facilidad de impresión con tintas, y permite la cocción en microondas.
<b>Poliamidas y poliimidias</b>	PA	Son un grupo de polímeros increíblemente fuertes y asombrosamente resistentes al calor y a los agentes químicos. Tienen estabilidad térmica, resistencia a los aceites, las grasas y la manteca, y transparencia a la radiación de microondas. Se consideran como polímeros técnicos muy versátiles.

Fuente: Empacado de alimentos. Guevara 2010.

#### 2.2.4. Biopolímeros en el uso de empaques

Los biopolímeros son polímeros que están presentes o son creados por organismos vivos, incluyendo aquellos polímeros que se obtienen a partir de recursos renovables y que pueden ser polimerizados para crear bioplásticos, y que por lo tanto, son biodegradables.

Las cuatro fuentes de obtención se pueden consultar en la Tabla 5.

**Tabla 5. Fuentes de los biopolímeros.**

<b>Origen</b>	<b>Biopolímero o bioplástico</b>
<b>Animal</b>	colágeno/gelatina
<b>Marino</b>	quinina/quitosano
<b>Agrícola</b>	lípidos y grasas; hidrocoloides (proteínas y polisacáridos).
<b>Microbiano</b>	ácido poliláctico (PLA) y polihidroxialcanoatos (PHA)

Fuente: Villada et al., 2006.

La Tabla 6, resume los biopolímeros que pueden ser utilizados en la producción de plástico para fines comerciales.

**Tabla 6. Biopolímeros para la producción de películas y recubrimientos**

<b>Biopolímero</b>	<b>Fuente</b>	<b>Descripción</b>
<b>Proteína de soya</b>	Granos de soya	La proteína se extrae naturalmente de la planta de soya.
<b>Polisacáridos</b>	Maíz, papa, trigo, mandioca y otros	<p>Son carbohidratos que se almacenan en el tejido vegetal. Están formados por glucosa. No se encuentra en tejidos animales.</p> <p>La estructura lineal de algunos de estos polisacáridos le proporciona a algunas películas dureza, flexibilidad y transparencia; las películas son resistentes a las grasas y aceites. Se realizan entrelazamiento, a fin de modificar las características de las películas haciéndolas más duras, insolubles en agua y de alta resistencia.</p>
Ácido láctico Polimerizado a ácido poliláctico (PLA)	Remolacha, maíz, papas y otros	Se produce por la fermentación y mediante la conversión de diversas fuentes de almidón. Se polimeriza para producir ácido poliláctico.
Celulosa	Madera, algodón, maíz, trigo y otros	Este polímero se compone de glucosa (componente principal de las paredes celulares de las plantas).
Quitosano	Crustáceos	Presenta biodegradabilidad, no es tóxico, es antifúngico y antimicrobiano. Las películas formadas con la adición de plastificantes presentan propiedades mecánicas, térmicas y de permeabilidad a los gases (O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> ), prolongan la vida de anaquel de los alimentos.
Pectina	Cáscara de frutos cítricos	Es un complejo aniónico polisacárido compuesto de β-1,4-D- ácido galacturónico residual, ésta puede ser pectina de alto metoxilo (HMP) o pectina de bajo metoxilo (LMP); la HMP forma excelentes películas.
<b>Poliéster</b>	Bacteria	Es de origen natural y se obtiene de reacciones químicas que se llevan a cabo por ciertos tipos de bacterias.
Polihidroxi-butilato (PHB)	La fermentación bacteriana de la glucosa y la alimentación con ácido acético durante el almacenamiento	Sólo o en combinación con plásticos sintéticos o con almidón, produce excelentes películas para empaques. Es un biopoliéster termoplástico que posibilita la acumulación de CO <sub>2</sub> , lo que permite el control de atmósferas y el crecimiento de bacterias, la desventaja es su alto costo de producción.

<b>Biopolímero</b>	<b>Fuente</b>	<b>Descripción</b>
Polihidroxialcanoatos (PHA)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Produce excelentes películas para empaques y permite controlar el CO <sub>2</sub> durante el almacenamiento de frutas y verduras.
Pululano	<i>Aureobasidium pullulans</i>	Es biodegradable, resistente a los aceites y grasas, tiene una excelente permeabilidad al oxígeno y no es tóxico.
<b>Colágeno/gelatina</b>	Piel, tendones, tejido conectivo, proteínas fibrosas de los animales. Resulta de la hidrólisis parcial del colágeno.	Son usadas en la preparación de envolturas comestibles. La gelatina produce una película flexible y gruesa y las propiedades mecánicas mejoran con NaCl a bajas concentraciones.
<b>Hidrocoloides</b>	Animal, vegetal	Son usados en algunas formulaciones específicas en el recubrimiento de algunos alimentos. Proveen buena barrera al O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , estas películas pueden ser suplementos nutricionales.
<b>Lípidos</b> Ceras, glicéridos y ácidos grasos	Vegetales y animales	Estos forman una gran parte de los lípidos de almacenamiento, se encuentran en las células vegetales y animales. Los aceites vegetales son una posible fuente de triglicéridos que se pueden polimerizar en plásticos.  Presentan excelentes propiedades de barrera a la humedad o como agentes de revestimiento para dar brillo, retardan la respiración, disminuyen la pérdida de humedad, aunque presentan deficiente resistencia mecánica, por lo que se usa en emulsiones.
Cera de candelilla	Árbol de la vida. <i>Copernicia Cerifera</i>	La proporción de sus componentes determina la dureza, impermeabilidad al agua, brillo y otras características propias de la cera. Una de las principales ventajas es su alta permeabilidad al O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , lo cual reduce la tendencia al desarrollo de sabores extraños.

Fuente: Quintero, 2010; Villada 2007 y disponible en: <http://bit.ly/PmpSUQ>

## 2.3. El Nopal

### 2.3.1. Ícono de nuestra patria

El nopal tiene una gran importancia en el país, ya que se encuentra presente en la vida social, cultural, económica y ambiental de la mayor parte del territorio nacional, debido a que se ha integrado en la alimentación de los mexicanos desde hace cientos de años y produce recursos importantes al país, además de generar un equilibrio ecológico.

De acuerdo con Reyes A. (2011), el nopal junto con el mezquite y el maguey, formaron el trío de plantas sagradas del México prehispánico siendo el eje de la economía cazadora-recolectora de los nómadas del altiplano mexicano; aún durante los siglos XIX y principios del XX, fue una planta prodigiosa, ya que suministró de verdura y fruta a la población para evitar las hambrunas que en el norte del país se derivaron de las guerras.

Fue parte del oráculo de los aztecas, como lo muestra la Figura 4, un nopal con tunas sobre el que se posa un águila, el cual simbolizaba la conexión cósmica sagrada entre el inframundo, a través de las raíces del nopal, y el cielo, por medio de las tunas que representaban los corazones sagrados que se ofrecían como sacrificio de la humanidad.



Fuente: Reyes A. J.A. El nopal. Un icono de la patria.

**Figura 4. Representación del oráculo de los aztecas**

Del nopal, en el México prehispánico, se aprovechaban, la penca y su fruto, se producía: miel, queso de tuna y licor. De la grana o cochinilla del nopal, se obtenía el pigmento que se usaba como pintura para la piel, la vestimenta y probablemente, para el cabello. El mucílago, tenía uso medicinal y cosmético (humectante de la piel), también se utilizaba como fijador de colores en las telas y murales, así como purificador del agua turbia y, como pegamento en la argamasa para unir adobes y enlucir paredes.

El uso del nopal como emblema al parecer inicia desde los manuscritos prehispánicos; existe un poco conocido y oficialmente denominado: *Códice Techialoyan García Granados*, que al parecer, es un árbol genealógico de la nobleza, que vincula gobernantes y pueblos. Esta estructura pictográfica se sostiene de un nopal, la Figura 5, muestra un fragmento de este códice; también aparece en estratagemas de



Fuente: Ávila P. J. México Heráldico. "El nopal genealógico"

**Figura 5. *Códice Techialoyan García Granados***

los frailes y en escudos europeos. En el siglo XIX formó parte de los estandartes, banderas, y sellos de los documentos de la independencia; en 1867 se estampó en el escudo de la República Restaurada, recuperando así, su categoría de árbol cósmico, fundacional y cimiento.

El nopal hace presencia en la vida sociocultural del país, desde refranes hasta leyendas, se dice que trazó los límites entre Zacatecas y San Luis Potosí y ha aparecido en innumerables paisajes mexicanos. De esta forma, el nopal ha sido histórico y forma parte de nuestra biodiversidad biológica, por lo tanto, es y será un ícono de nuestra patria.

### 2.3.2. Origen y especies

Esta planta es una cactácea originaria de América, actualmente, se encuentra en todos los continentes en diferentes condiciones agroclimáticas, ya sea silvestre o cultivada. La familia está formada por 1 600 especies, la mayoría de ellas son nativas de nuestro país con alrededor de 1 088.

El género *Opuntia* se denominó así, gracias a un pueblo antiguo de Grecia llamado Opus u Opuncia. De acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), se reconocen 220 especies, en México existen entre 60 y 90 de ellas. El género *ficus indica* y *nopalea*, son cultivados para consumo como nopal verdura; del primero se cultivan dos especies y para el segundo género sólo una es útil.

En la Figura 6, se muestra la especie *Opuntia ficus indica* y en la Figura 7, la especie *nopalea*. La Figura 8, muestra de manera general un mapa de la distribución del nopal incluyendo, de forma ilustrativa, a la tuna y al xoconostle.



**Figura 6. Especie *Opuntia ficus-indica***

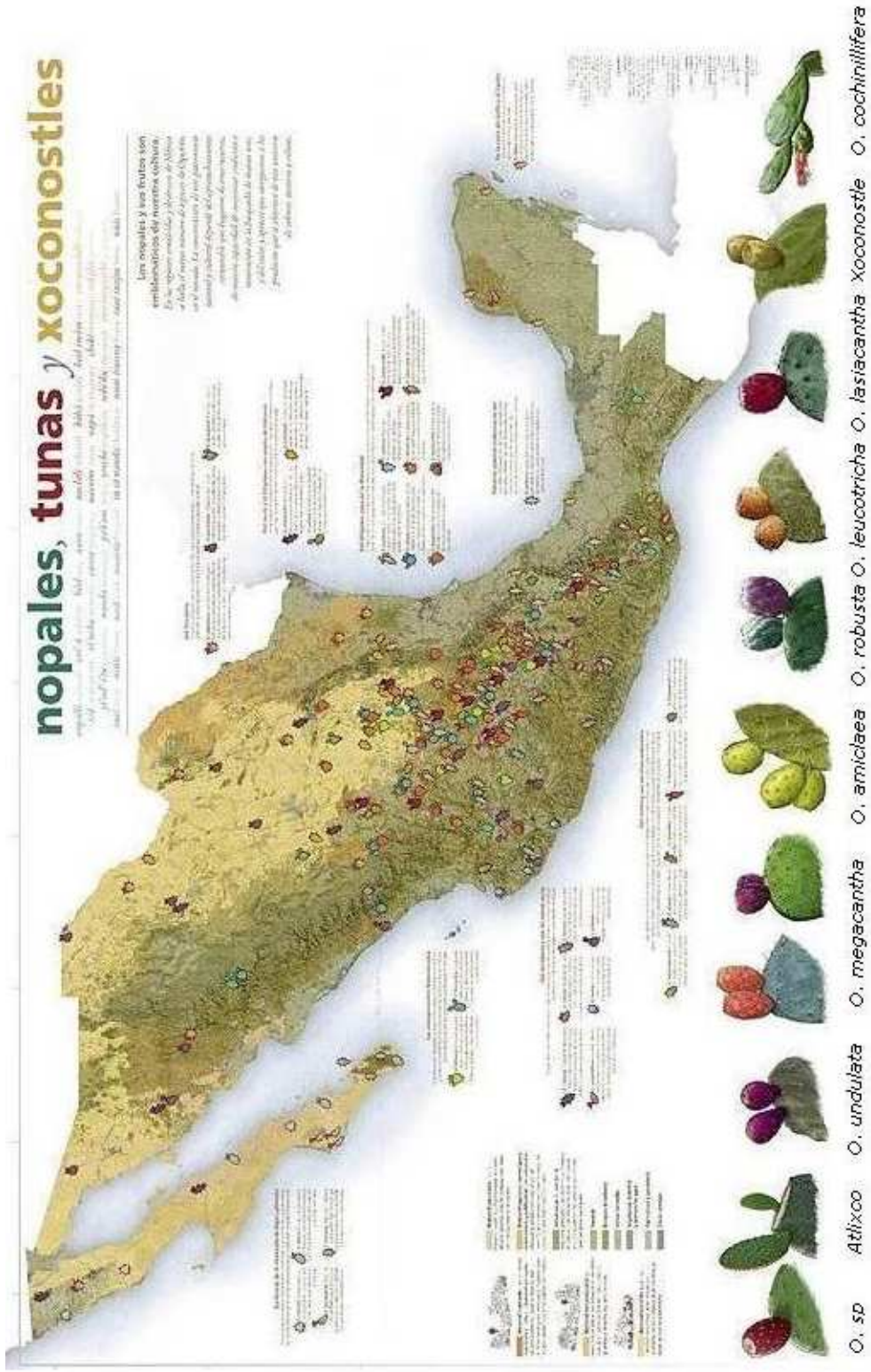
Fuente: <http://bit.ly/PK0Xqv>



**Figura 7. Especies *Opuntia nopalea***

Fuente: <http://bit.ly/Rrbyqt>





Fuente: <http://bit.ly/PK0Xqy>

**Figura 8. Distribución de las especies de nopal en México**



### **2.3.3. Descripción**

El género *Opuntia ficus indica* es un vegetal arborescente que mide de 3 a 5 m de alto, su tronco es leñoso de altura entre 20 y 50 cm de diámetro; los tallos tienen forma de raquetas llamadas cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor, están llenos de agua que se encuentra retenida en un entramado viscoso de carbohidratos llamado mucílago (baba del nopal), son de color verde opaco con areolas que contienen pocas espinas (el tipo y la cantidad es muy variable y depende de las condiciones del medio en que viva), los cladodios transforman la luz en energía química a través de la fotosíntesis, la cutícula es de tipo lipídica y evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas, estos pueden ser aprovechados tiernos, para consumo humano, desde los 8 ó 10 días de haber brotado; las flores miden de 7 a 10 cm de largo, son diurnas, solitarias y nacen en la base; su fruto es oval de 5 a 10 cm de largo por 4 a 8 cm de diámetro, presenta abundante pulpa carnosa de sabor dulce y su color puede ser amarillo, naranja, rojo o púrpura.

Comúnmente, las plantaciones viven de 5 a 7 años, en ocasiones hasta los 10 con buenos rendimientos; en terrenos con pH neutro, con prácticas adecuadas de cultivo y sin problema de plagas pueden llegar a vivir hasta 80 años, para el caso de las plantaciones de explotaciones intensivas, solamente, alrededor de 3 años.

Tanto la morfología como la fisiología de estas cactáceas se ha adaptado a la escasa disponibilidad de agua, por lo que resisten elevadas temperaturas y periodos prolongados de sequía, actualmente, tienen un importante papel ecológico, al frenar la degradación de los suelos deforestados y regenerar los suelos erosionados.

#### **2.3.4. Composición química**

Dentro de la composición química del nopal, encontramos un alto contenido de agua (95% máximo), además de carbohidratos y componentes nitrogenados en diferentes proporciones. Los principales minerales que contiene son el Calcio, el Potasio y el Magnesio, así como, Fósforo, Manganeso, Hierro, Zinc y Cobre, en la Tabla 7, se describe la composición química del nopal a detalle.

**Tabla 7. Composición química del nopal variedad *O. cv Milpa Alta***

	Base seca		Base húmeda	
<b>Contenido de agua</b>	-		88-95	
<b>Carbohidratos (g/100 g)</b>	64-71		3-7	
<b>Cenizas (g/100 g)</b>	19-23		1-2	
<b>Fibra (g/100 g)</b>	18		1-2	
	44.78 -66.87			
<b>Proteínas (g/100 g)</b>	4-10		0.5-1	
<b>Lípidos (g/100 g)</b>	1-4		0.2	
<b>Minerales (mg/100 g)</b>				
<b>Potasio</b>	50			
<b>Calcio</b>	18-57			
<b>Magnesio</b>	11-17			
<b>Cobre</b>	0.008-0.009			
<b>Manganeso</b>	0.062-0.103			
<b>Zinc</b>	0.022-0.027			
<b>Hierro</b>	0.059-0.066			
<b>Fósforo</b>	0.27-0.43			
<b>Ácidos orgánicos (g/100 g)</b>	6:00 h	18:00 h	6:00 h	18:00 h
<b>Ácido oxálico</b>	0.035	0.035		
<b>Acido málico</b>			985	95
<b>Ácido cítrico</b>			178	31
<b>Ácido malónico</b>			36	tr
<b>Ácido succínico</b>			tr	tr
<b>Ácido tartárico</b>			tr	tr
<b>L-aminoácidos (mg /100 g)</b>				
<b>Alanina</b>				0.6
<b>Arginina</b>				2.4
<b>Asparagina</b>				1.5
<b>Ácido aspartámico</b>				2.1
<b>Ácido glutámico</b>				2.6
<b>Glutamina</b>				17.3
<b>Glicina</b>				0.5
<b>Histidina</b>				2.0
<b>Isoleucina</b>				1.9
<b>Leucina</b>				1.3
<b>Lisina</b>				2.5
<b>Metionina</b>				1.4
<b>Fenilalanina</b>				1.7
<b>Serina</b>				3.2
<b>Treonina</b>				2.0
<b>Tiroxina</b>				0.7
<b>Triptofano</b>				0.5
<b>Valina</b>				3.7
<b>Vitaminas (mg/ 100 g)</b>				
<b>Ácido ascórbico</b>				7-28.15
<b>Niacina</b>				0.46
<b>Riboflavina</b>				0.60
<b>Tiamina</b>				0.14
<b>β-Caroteno</b>				0.0113-0.0543
<b>Compuestos fenólicos (mg/100 g)</b>				205
<b>Flavonoides (mg/100 g)</b>				260
<b>Oxalato de calcio (mg/g)</b>	3.47-7.95			
<b>Ca/P (mg/g)</b>	3.6-11			

Fuente: Tecnología Postcosecha y Aspectos Biofuncionales del Nopal y la Tuna. Guevara (2012).

### 2.3.5. Sistema de producción

La cosecha de nopal verdura, se realiza cuando los brotes alcanzan un peso cercano a los 120 g, o bien, cuando presentan una longitud entre 10 y 15 cm; aunque está en función del mercado demandante.

La producción agrícola de nopalito durante el año 2010, fue alrededor de las 722 000 toneladas. Las principales entidades productoras fueron el Distrito Federal y Morelos. Esto los podemos observar en la Tabla 8.

**Tabla 8. Principales estados productores de nopal**

<b>Estado</b>	<b>Producción obtenida (t)</b>	<b>% Producción</b>	<b>Superficie cosechada (ha)</b>
<b>Distrito Federal</b>	294 486	40.81	4 337
<b>Morelos</b>	275 210	38.15	3 247
<b>Edo. de México</b>	58 827	8.15	790
<b>Baja California</b>	26 963	3.74	605
<b>Jalisco</b>	13 776	1.90	374
<b>Total Nacional</b>	721 441	100	12 071

**Fuente:** Elaboración propia con datos de SIAP (2010).

Los principales mercados del nopal verdura en el país son: Ciudad de México (Milpa Alta, D.F.), Guadalajara (Jalisco), Monterrey (Nuevo León), Puebla (Puebla), San Luis Potosí (S. L. P.), Cuernavaca (Morelos), Morelia (Michoacán), Torreón (Coahuila) y Guanajuato (Guanajuato).

El aprovechamiento integral de esta especie representa un gran atractivo para el sector agroindustrial. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) los sectores que se benefician se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9. Aprovechamiento del nopal por sectores**

<b>Sector</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano</b>	Encurtidos, mermeladas, jugos, néctares, productos deshidratados, concentrados, jarabes, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitas, harinas (dulces, panes, galletas, tostadas, tortillas).
<b>Agroindustria de alimentos para animales</b>	suplementos y piensos de pencas y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas
<b>Industria farmacéutica</b>	protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal
<b>Industria cosmética</b>	cremas, champú, lociones, mascarillas
<b>Industria de suplementos alimenticios</b>	fibra y harinas de cladodios, con fines de control de la diabetes, obesidad, entre otros
<b>Industria productora de aditivos naturales</b>	gomas de cladodios; colorantes de la fruta
<b>Construcción</b>	compuestos ligantes de los cladodios
<b>Energético</b>	producción de biogás a partir de las pencas
<b>Productos de insumos para la agricultura</b>	productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos
<b>Turismo</b>	artesanías con base en cladodios lignificados
<b>Industria textil</b>	uso indirecto como hospedero de la grana cochinilla para producir colorantes naturales

Fuente: Elaboración propia con datos de Financiera Rural (2011).

### **2.3.6. Biomacromoléculas del nopal**

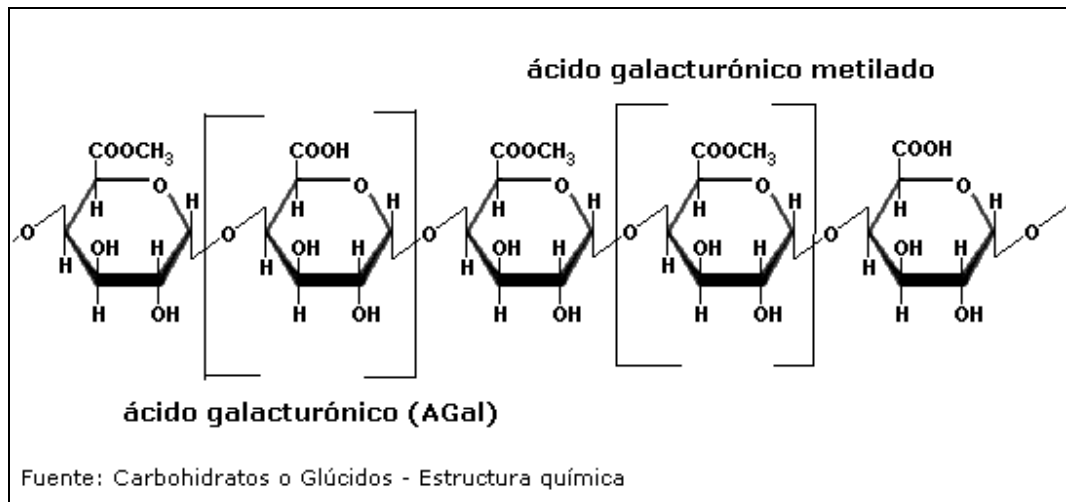
Diversos estudios han demostrado que del nopal se pueden extraer dos biomacromoléculas, la pectina y el mucílago, las cuales tienen características de hidrogel; aunque no existe una definición exacta, los hidrogeles se consideran como materiales poliméricos entrecruzados en forma de red tridimensional de origen natural o sintético, que se hinchan en contacto con el agua formando materiales blandos y elásticos, y que retienen una fracción significativa de la misma en su estructura sin disolverse.

#### **2.3.6.1. Pectina**

Las sustancias pécticas (pectina), son un grupo de polisacáridos estructurales de la lamela media y pared celular primaria de las plantas superiores, conformado principalmente por residuos de ácido galacturónico (AGal), los cuales, se encuentran parcialmente esterificados con metanol (Voragen et al., 2009). Las estructuras principales que se han distinguido son cuatro: homogalacturonano (HG), rhamnogalacturonano I (RG-I), rhamnogalacturonano II (RG-II), y xylogalacturonano (XG).

La pectina está constituida de aproximadamente un 60% de homogalacturonano, el cual corresponde a un homopolímero del ácido urónico  $\alpha$ -D-galactosil. La longitud estimada de esta columna es de 72 a 100 residuos.

La Figura 9, muestra la estructura de la pectina.



**Figura 9. Estructura de la pectina**

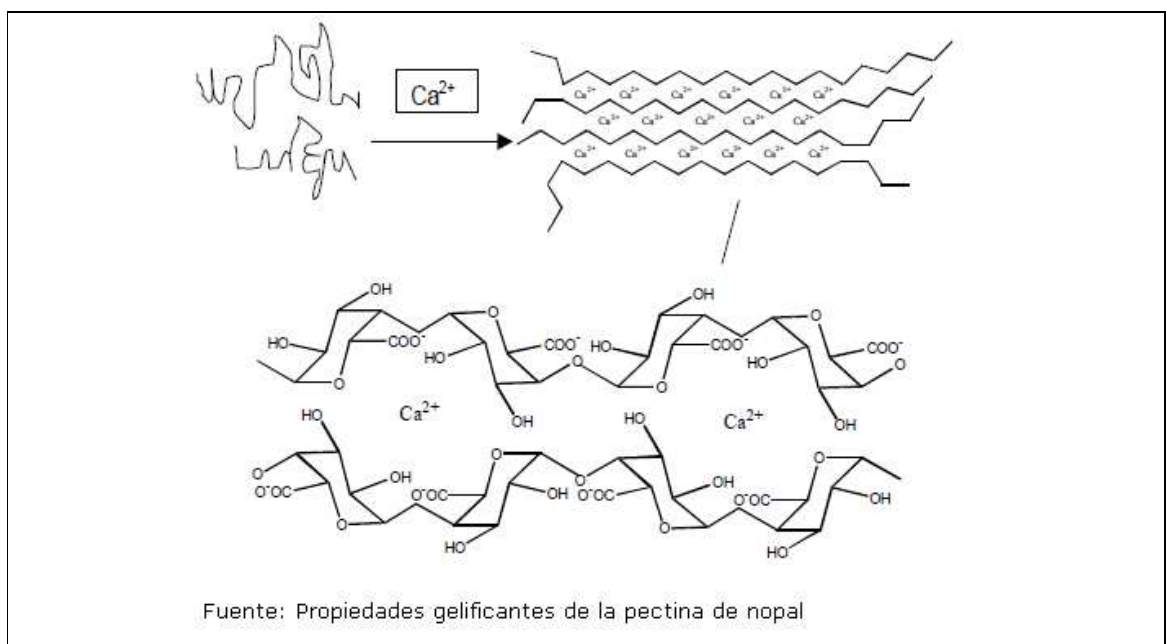
Las pectinas se utilizan para estabilizar y modificar la textura a fin de incrementar la viscosidad (gelificar) en los alimentos, los productos farmacéuticos y en los sistemas cosméticos. Recientemente, se ha utilizado para desarrollar recubrimientos comestibles, espumas, plastificantes, adhesivos y sistemas de administración o liberación de fármacos (Mohnen, 2008).

Las propiedades físicas y funcionales (capacidad de gelificación) de la pectina dependen, fuertemente, de los parámetros estructurales y composicionales, como son: el contenido de AGal, el grado de metil-esterificación y la distribución de masa molecular, esto influye, considerablemente, en su funcionalidad.

Existen cambios en la conformación tridimensional (radio de giro) como resultado de la influencia que ejerce la carga de los grupos carboxilo ionizables, por cambios en el pH y la fuerza iónica, los cuales, a su vez pueden modificar en gran extensión la capacidad de la pectina para aumentar la viscosidad en solución acuosa (Walstra, 2005).

En cuanto a la formación de geles, las pectinas con alto grado de metil-esterificación (HM) lo hacen con soluciones ácidas que contienen cosolutos (sacarosa), por su parte las pectinas con bajo grado de metil-esterificación (LM) pueden producir geles, a través de cationes divalentes como lo muestra la Figura 10. El alto grado de acetilación, observado en la pectina de remolacha azucarera, inhibe la gelificación (May, 2000).

La masa molecular es también un factor importante en la funcionalidad de las pectinas, su incremento tiende a aumentar la viscosidad de las soluciones, así como también la fuerza de gel.



**Figura 10. Esquema de la gelificación de pectina de bajo grado de metil-esterificación**

Las principales fuentes de la pectina son, las cáscaras de cítricos y la pulpa de manzana, sin embargo, la creciente demanda de este tipo de compuestos ha llevado a explorar nuevas fuentes de pectina como son, la remolacha azucarera, las cáscaras de mango, las cabezas de girasol, entre otras (Voragen et al, 2009; Willats et al., 2006).



Otro grupo de especies de plantas que también ha sido considerado y es típico de paisajes mexicanos, es el género *Opuntia*, así mismo, tanto la tuna como los cladodios del género *Opuntia*, han sido objeto de estudio, sobre todo porque los cactus de *Opuntia spp* representan una alternativa de desarrollo en zonas áridas y semiáridas en diferentes países (Guevara, 2012; Cárdenas et al., 2008; Majdoub et al., 2001a).

Se ha reportado que la pectina proveniente de la cáscara o pulpa de la tuna de *Opuntia ficus indica*, que tiene un bajo grado de metil-esterificación (LM), y un alto contenido de azúcares neutros, principalmente, de galactosa (Gal), arabinosa (Ara) y ramnosa (Rha) (Majdoub, et al., 2010). Sin embargo, el AGal y el contenido de azúcares neutros en estas pectinas dependerán de las condiciones de extracción. Las pectinas extraídas mediante tratamientos ácidos calientes y por soluciones quelantes, contiene suficiente AGal para ser consideradas como aditivo funcional (Habibi et al., 2005b). Por su parte, las pectinas de nopal extraídas bajo condiciones alcalinas y soluciones quelantes se encuentran completamente desesterificadas, con un alto contenido de AGal (85.4%) y mostraron capacidad de gelificación en presencia de iones de calcio (Cárdenas et al., 2008).

La capacidad de gelificación de la pectina de nopal permite considerar al género *Opuntia ficus-indica* como una posible fuente funcional de pectina (LM). Sin embargo, varios parámetros tales como la disponibilidad de materia prima, el costo de extracción, el rendimiento, y la composición de la pectina tienen que ser considerados para determinar su viabilidad como fuente de pectina. En particular, los efectos de las condiciones de extracción sobre parámetros relevantes, tales como, el rendimiento y la composición de la pectina, son inexistentes para los cladodios secos como materia prima.

### **2.3.6.2. Mucílago**

La producción de mucílagos, frecuentemente referida como polisacáridos pectínicos, es característica de miembros de la familia de las cactáceas (Nobel et al., 1992).

En relación a la composición química del mucílago de nopal Amin et al. (1970) encontraron que el mucílago es un polisacárido neutro que contiene arabinosa, ramnosa, galactosa y xilosa.

Pausen y Lund (1979) reportaron que el extracto de *Opuntia ficus-indica* se componía de una mezcla de un glucano neutro, glicoproteínas y un polisacárido ácido que contiene L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido D-galacturónico.

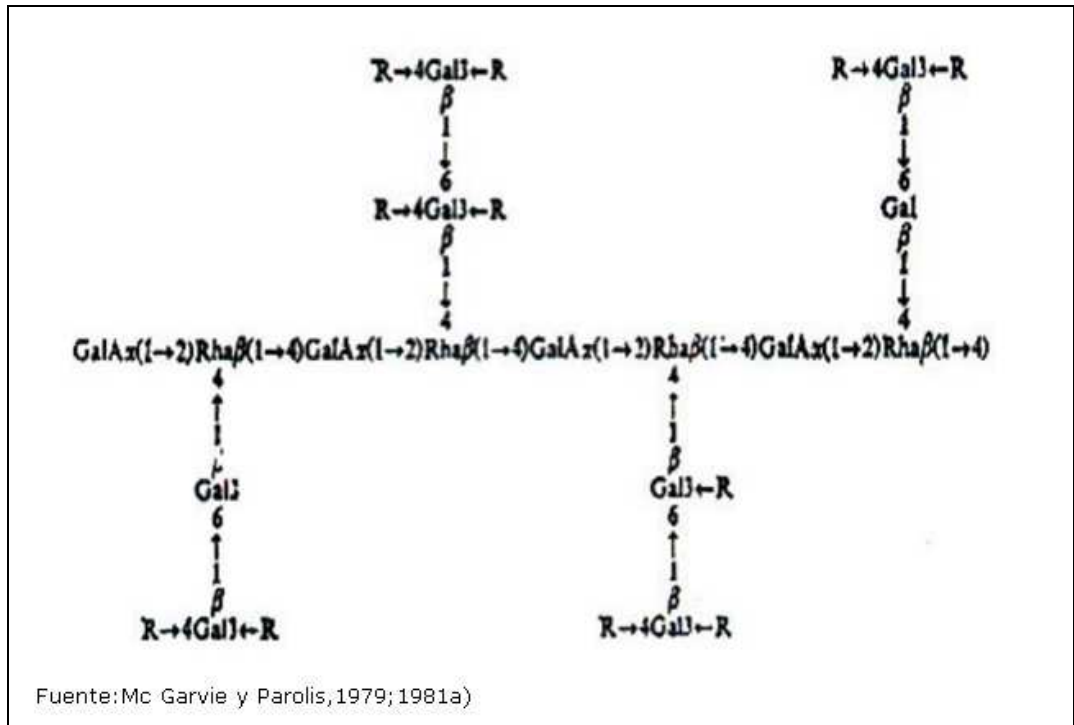
Por su parte McGarvie y Parolis (1979) reportaron que las principales unidades de azúcares neutros en el mucílago de nopal estaban compuestas por D-galactosa, L-arabinosa, D-xilosa y L-ramnosa, al igual que ácido D-galacturónico, lo cual concuerda con lo reportado por Cai et al. (2008).

De acuerdo con Trachtenberg y Mayer (1981), el mucílago es un polisacárido, el cual contiene un 10% de ácido urónico, arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa.

Forni et al. (1994) reportó haber aislado un mucílago con alto contenido de ácido galacturónico, alrededor de un 64%, de las cáscaras de la fruta "tuna".

McGarvie y Parolis (1981a, b) encontraron que el mucílago de nopal estaba compuesto de una familia de polisacáridos altamente ramificados y que, de manera general, contiene varias proporciones de L-arabinosa (en forma piranosa y furanosa), D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa

como las unidades de azúcares neutros mayoritarios, al igual que ácido D-galacturónico. La Figura 11 muestra esta estructura propuesta.



**Figura 11. Estructura de los polisacáridos del mucílago de nopal**

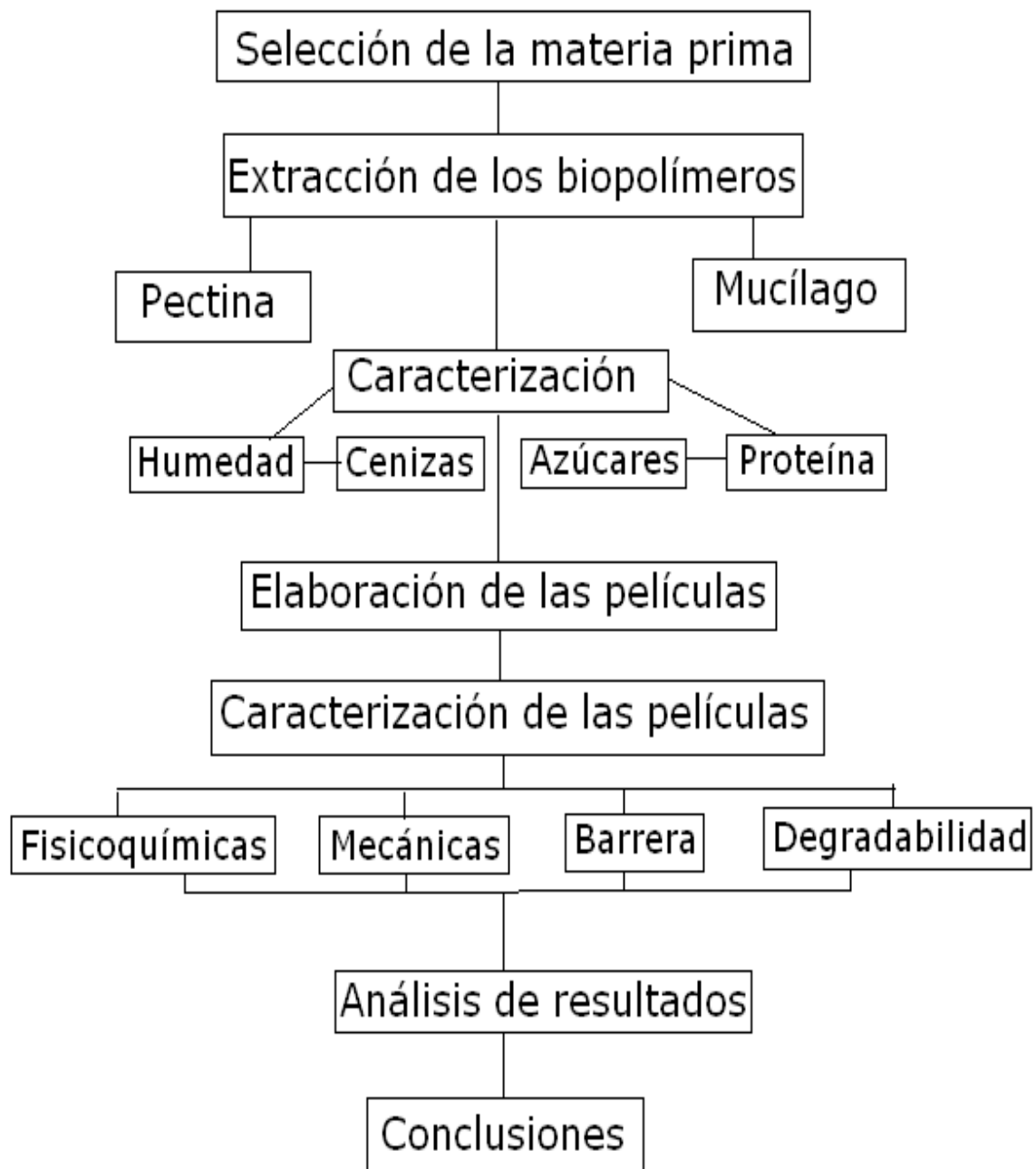
En relación a la masa molecular, se ha reportado que el mucílago del nopal *Opuntia* está en el orden de  $2.3 \times 10^4$  Da -  $4.3 \times 10^6$  Da, Medina-Torres et al 2000; Trachtenberg y Meyer, 1982, respectivamente.

### **III. Metodología**

El presente estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Fitoquímicos y Bioproductos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y a través, de la Secretaria de Investigación y Posgrado mediante el apoyo de Fomento Académico a la Investigación (FAI).

El procedimiento de obtención y evaluación de la funcionalidad de las películas de nopal, se muestra en la Figura 12, el cual consistió en:

1. La extracción y caracterización de los polímeros de nopal; para el caso del mucílago, se realizó con base en estudios previos de diversos autores, debido a que no existe una técnica estandarizada.
2. La elaboración y caracterización de las películas en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas, térmicas y de barrera, así como, su capacidad de degradación.
3. Con base en el análisis de resultados se concluyó sobre las características y funcionalidad de cada película, así como de su posible aplicación en el empacado de alimentos y su posible impacto como residuo sólido.



**Figura 12. Plan de trabajo para la elaboración de las películas de nopal**

### **3.1. Extracción y caracterización de los polímeros del nopal**

Para la obtención de los biopolímeros se utilizaron Nopales cv. *Milpa Alta* cultivados en Milpa Alta D.F., México, con una madurez fisiológica de 90 días, se cosecharon y transportaron al laboratorio donde se seleccionaron y clasificaron con base en su tamaño, apariencia uniforme y libre de daños.

#### **3.1.1. Método de extracción del mucílago**

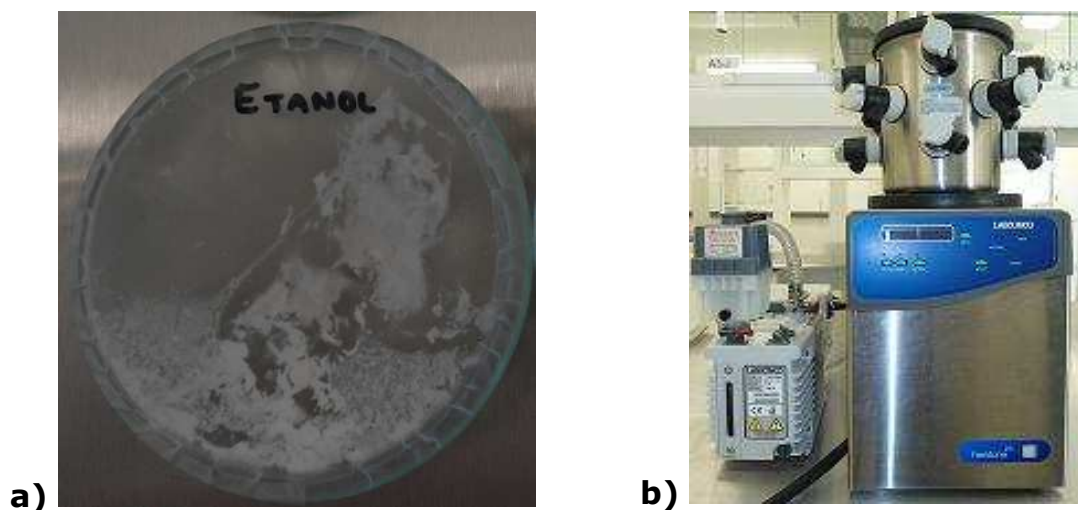
La extracción del mucílago se realizó conforme lo reportado por Sepúlveda et al. (2007) y Goycoolea y Cárdenas (2003). Los nopales se picaron y se homogenizaron con agua en proporción 1:1 (p/p) hasta obtener un líquido viscoso homogéneo utilizando un procesador de alimentos (Figura 13), posteriormente se dio un tratamiento térmico a 85 °C durante 20 min, a fin de prevenir la acción enzimática.



**Figura 13. Muestra base para la extracción del mucílago**

La mezcla se filtró a través de una manta de cielo y el filtrado se separó en una centrifuga (Hermle-Labortechnik, Wehingen, Germany) bajo las siguientes condiciones: 10 000 rpm, 18 min a 25 °C.

El sobrenadante fue recuperado y precipitado con etanol al 65% (v/v) por 20 h a 4 °C. Después de la precipitación, las muestras fueron lavadas dos veces con etanol al 95% y liofilizadas a una temperatura de -12 °C durante 8 h, utilizando un liofilizador Free Zone 77540 (Labconco Co., Kansas City, Mo., U.S.A). Esto puede apreciarse en la Figura 14.



**Figura 14. a) Mucílago liofilizado y b) liofilizador**

### **3.1.2. Método de extracción de la pectina**

Para la extracción de la pectina, se pesaron 0.02 kg de harina de nopal y se mezcló con 100 mL de etanol bajo agitación por 20 min a temperatura ambiente. La mezcla se centrifugó a 10 000 rpm, por un tiempo de 15 min a 15 °C. El sedimento obtenido se mezcló con 100 mL de acetona y se puso en agitación durante 20 min y posteriormente se centrifugó a 10 000 rpm, 15 min a 15 °C. El sedimento de la harina despigmentada se mezcló con 1 L de agua destilada y se calentó a 85 °C durante 20 min, esta mezcla se enfrió hasta alcanzar una temperatura de 30 °C y se centrifugó a 10 000 rpm, durante 10 min a 25 °C.

A los gramos de residuo sólido obtenido se le agregó EDTA, a fin de obtener una solución con una concentración del 20% (g de EDTA/g de harina de nopal); el pH se ajustó a 2 con una solución de HCl 4 N. La suspensión se calentó hasta alcanzar los 80 °C durante 10 min, posteriormente, se dejó enfriar a 30 °C, nuevamente, se ajustó el pH a 7 con una solución de NaOH 0.4 M y se procedió a centrifugar a las siguientes condiciones: 10 000 rpm, durante 10 min a 15 °C. La Figura 15, muestra a la pectina centrifugada.

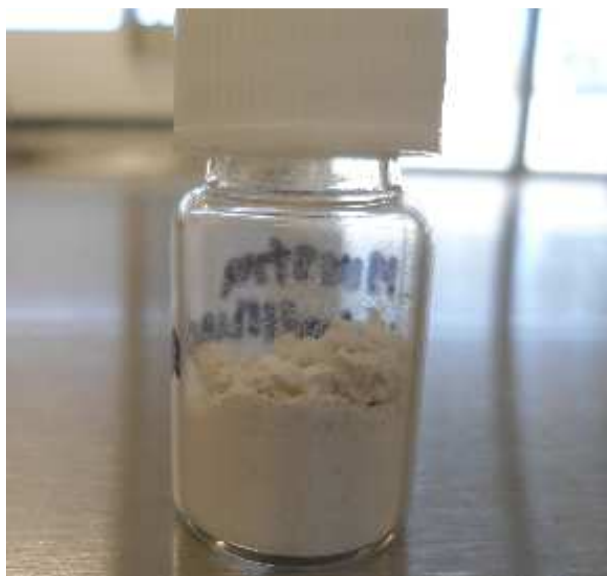


**Figura 15. Muestra de pectina centrifugada**



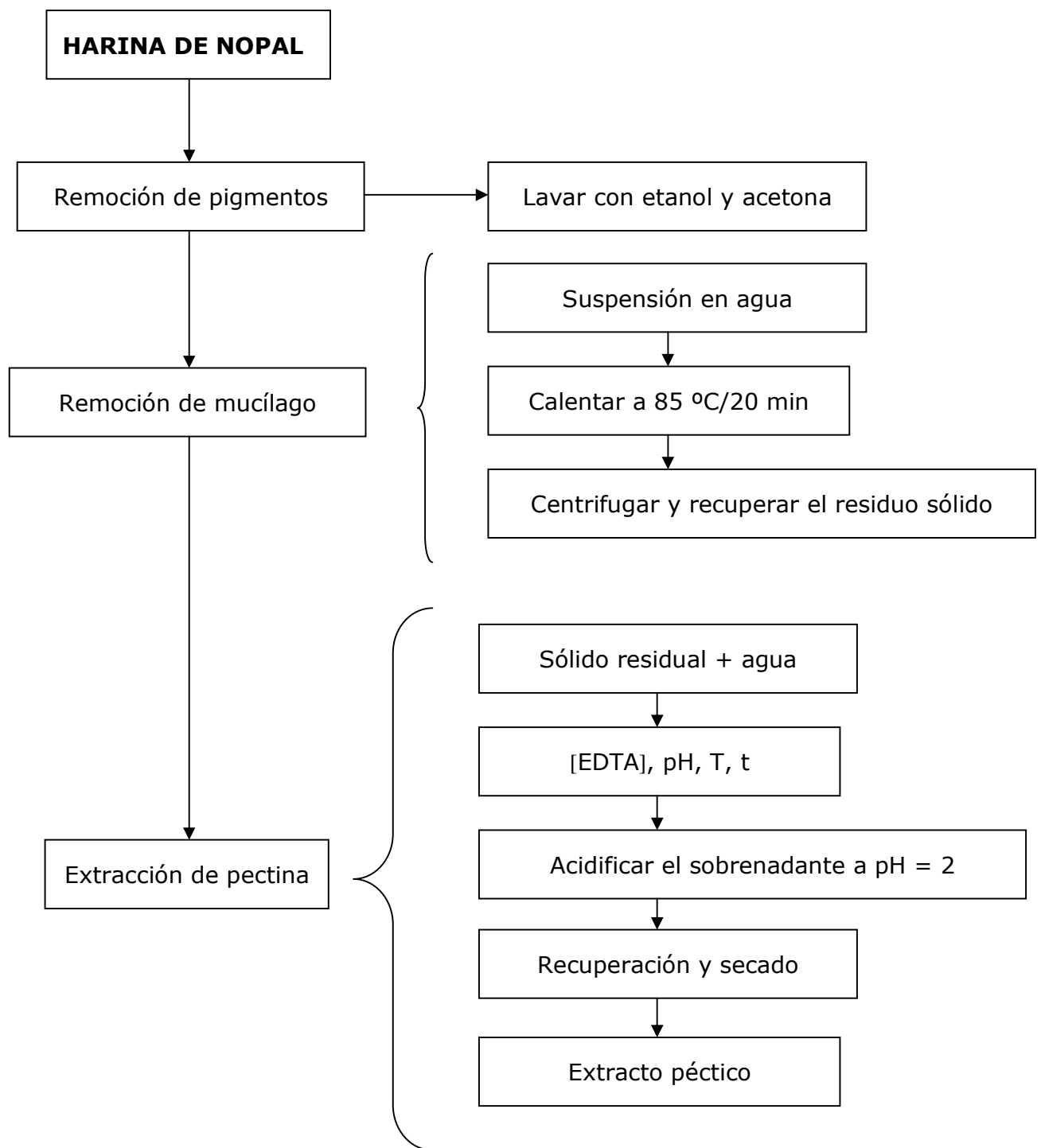
El sobrenadante se ajustó a pH 2 utilizando una solución de HCl 4 M, y se centrifugó a 10 000 rpm, 10 min a 15 °C. Los sólidos se disolvieron en 100 mL de agua, se ajustó el pH a 8 con NaOH 0.1 N y se filtró utilizando papel Whatman del no. 3.

La pectina se precipitó con etanol al 96 % en relación 1:1 (v/v). Esta mezcla se enfrió a 4 °C durante 24 h y se separó el gel. La pectina se secó en la estufa a 60 °C durante 30 h, luego se molió en un mortero y se almacenó hasta su análisis, la Figura 16, muestra el producto obtenido.



**Figura 16. Pectina liofilizada para su posterior análisis**

La figura 17, muestra el proceso de extracción de la pectina de nopal.



**Figura 17. Proceso de extracción de pectina de nopal**

### 3.1.3. Caracterización del mucílago y la pectina

El mucílago de nopal fue caracterizado por su contenido de azúcares (ISO 11292:1995), proteína (Bradfort, 1976), humedad (AOAC 930.04, 2005), cenizas (AOAC, 930.05, 2005) y calcio (espectrofotometría de absorción atómica).

#### Azúcares

Para la determinación de azúcares, se pesaron muestras de 10 mg de mucílago o pectina, posteriormente fueron hidrolizadas con 6 mL de HCl 1 M durante 150 min a una temperatura de 100 °C. Las muestras hidrolizadas se filtraron a través de cartuchos de Sep Pack C-18 (Watters, Mass., U.S.A.), una vez filtradas se secaron (la temperatura de secado se mantuvo entre los 35 y 40 °C), se lavaron 2 veces con agua y se secaron nuevamente. Los residuos se disolvieron en agua (Figura 18) y se filtraron a través de una membrana de 0.45 µm antes de ser inyectados (20 µL) en un sistema de cromatografía de líquidos de alta resolución DIONEX DX 600 (Dionex Corp., N.Y., U.S.A.), el cual está equipado con un detector electroquímico ED 50 y una columna Carbopac PA1 (4 x 250 mm; Dionex Corp.). La fase móvil fue agua grado HPLC a una velocidad de flujo de 1 mL/min y 300 mM de NaOH post columna a una velocidad de 0.6 mL/min. Finalmente, se identificaron y cuantificaron los monosacáridos de las muestras utilizando compuestos estándar.



**Figura 18. Disolución de residuos de muestras hidrolizadas de biopolímero**

## **Proteínas**

La determinación de proteínas se realizó por el método de Bradford (1976). Para preparar el Reactivo de Bradford, se disolvieron 2.5 mg del colorante azul de Coomasie G-250 en 1.25 mL de etanol al 95% y se adicionaron 2.5 mL de ácido fosfórico al 85%, esta solución se aforó a 25 mL con agua desionizada, para obtener concentraciones finales de 0.01% (p/v) de colorante azul de Coomasie, 4.15% (v/v) de etanol y 8.5% (p/v) de ácido fosfórico. El contenido de proteína se determinó espectrofotométricamente a 595 nm.

La distribución de la masa molecular del mucílago y la pectina se realizó mediante cromatografía de exclusión por tamaño de alta resolución (HPSEC) utilizando un sistema PLC ProStar (Varian Inc., Walnut Creek Calif., U.S.A.) equipado con dos bombas modelo 210 y un detector de índice de refracción (Varianstar 9040).

El sistema cromatográfico incluyó una columna TSK-Gel GPW<sub>XL</sub> (7.8 x 300 mm, 13  $\mu$ m; TosohBioscience, Minato-kuTokyo, Japan) a una temperatura de 40 °C. La fase móvil fue una solución amortiguadora de fosfatos 0.2 M y pH de 6.9 a una velocidad de 1 mL/min. Para esta determinación se utilizaron como estándares dextranas marca Sigma Chemical, Co., Miss., U.S.A. con masa molecular de 1 000 a 67 000 Da. En la Figura 19, se muestra el equipo de HPLC utilizado para la determinación de la MM de los biopolímeros.

La determinación de ácido galacturónico en la pectina se realizó conforme a lo reportado por Filisetti-Cozzi y Carpita (1991).

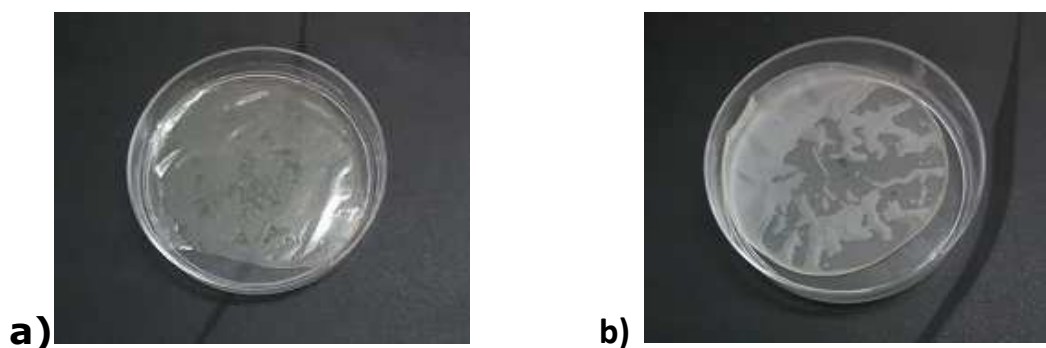


**Figura 19. Equipo para la determinación de masa molecular de los biopolímeros**

### **3.2. Diseño y caracterización de las películas**

#### **3.2.1. Elaboración de las películas a base de nopal**

Las soluciones filmógenas consistieron de mucílago y/o pectina de nopal, glicerol y agua destilada en proporción 2:1:70, respectivamente. La dispersión formadora de la película se mantuvo 10 h bajo agitación magnética, una vez transcurrido el tiempo fue almacenada una noche a 25 °C. Este procedimiento aseguró la desintegración de los agregados de biopolímero para formar una dispersión homogénea. La Figura 20, muestra los resultados del procedimiento.



**Figura 20. Películas obtenidas de las dispersiones a) mucílago y b) pectina**

### **3.2.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas**

#### **3.2.2.1. Espesor**

El espesor de las películas se determinó en cinco puntos sobre la superficie de la película, utilizando un micrómetro Starrett (The L.S. Starrett Co., LTD. Jedburg Scotland) y el valor se expresó en metros, conforme a lo reportado por Guevara et al (2006). La figura 21, hace una referencia a los puntos en donde pueden tomarse los valores del espesor.



5 puntos de la superficie de la película

**Figura 21. Referencia para la determinación del espesor en las películas**

#### **3.2.2.2. Densidad**

La densidad de las películas se determinó a partir de las dimensiones de las películas y de su peso.

#### **3.2.2.3. Color**

El color se evaluó utilizando un colorímetro (CR 410 Chroma meter, Minolta, Japan) en ambos lados de la película (adherida y expuesta al ambiente), determinando las coordenadas colorimétricas: luminancia

L\*(claridad), a\*, b\*, la cromaticidad o saturación C\* (Croma) y el tono angular hue h\* (Guevara et al., 2009).

#### **3.2.2.4. Humedad**

La humedad de las películas se determinó mediante el método 934.06 AOAC (1998), el cual se fundamenta en la pérdida de peso de una muestra.

#### **3.2.3. Determinación de las propiedades mecánicas**

Se determinaron los parámetros de resistencia a la tensión de carga (TS), el porcentaje de elongación al rompimiento (%E) y el módulo elástico (EM), utilizando un analizador de textura TA-XT2i (Figura 22), equipado con una celda de carga de 25 kg (Stable Micro Systems, Haslernere, UK, and Texture Technologies corp., Scarsdale, NY.). Los parámetros de interés se determinaron con base en las curvas de deformación contra fuerza obtenidas.



**Figura 22. Equipo utilizado para obtener las curvas deformación vs tensión**

Las películas se equilibraron en un desecador conteniendo solución salina de NaBr (57% HR) durante 48 h previo a su análisis, conforme a la metodología D 638M-93 (ASTM, 1998).

#### **3.2.4. Determinación de las propiedades de barrera (permeabilidad) al O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y vapor de H<sub>2</sub>O**

La permeabilidad al O<sub>2</sub> y al CO<sub>2</sub> se determinó por triplicado utilizando una celda de difusión construida en acero inoxidable. Los cálculos, unidades y definiciones vienen dadas en la metodología estándar D1434-82 (ASTM, 1998). En la determinación se utilizaron nitrógeno, oxígeno superseco y dióxido de carbono, todos de alta pureza (99.9%) de marca AGA (AGA S. A. de C. V., México). Las concentraciones de los gases (O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) se determinaron utilizando un analizador de gases portátil marca NITEC, modelo GA-20 (Nitec Inc., Cincinnati, OH).

La permeabilidad al vapor de agua (P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) se determinó con base en la metodología de la E398-03 ASTM (1998), utilizando el método del agua. Se utilizaron cajas petri de 9 cm de diámetro y altura de 1.8 cm, se adicionaron 25 mL de agua destilada, quedando selladas con la película a prueba. La pérdida en peso se determinó gravimétricamente empleando una balanza "Explorer" con una sensibilidad de 10 mg (OHAUS, USA) durante 25 días cada 5 días.

#### **3.2.5. Evaluación de las propiedades térmicas**

El análisis térmico se realizó utilizando un calorímetro diferencial de barrido 2010 (TA Instruments, New Castle, NJ) previamente calibrado con indio. La temperatura de transición se evaluó conforme el método propuesto por Paredes-López et al. (1994).



Se pesaron muestras de películas de entre 10 y 15 mg en una charola de aluminio y posteriormente fueron selladas. Se utilizó una charola vacía como referencia.

Las muestras se sometieron a dos programas de calentamiento, uno en el intervalo de -160 a 20 °C y el segundo intervalo de 20 a 180 °C, ambos a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. La temperatura de pico y la entalpía de transición ( $\Delta H$ ) se obtuvieron directamente del análisis utilizando el software TA Instrument Universal Analysis 2000 for Windows 3.2B. En la Figura 23, se muestra el equipo utilizado en estas determinaciones.



**Figura 23. Calorímetro diferencial de barrido utilizado para la determinación  $T_m$ ,  $T_g$  y sus entalpías**

### **3.2.6. Prueba de degradabilidad**

La degradabilidad de las películas formuladas con mucílago y pectina de nopal se llevó a cabo conforme a lo reportado por Dalev et al., (2000). Se tomó tierra de la capa superficial del suelo, se le eliminaron todos los materiales inertes hasta obtener una masa homogénea; se pesaron 100 g de esta tierra y se vertieron en un contenedor plástico de 3 cm de espesor.

Se sacaron muestras por triplicado de cada una de las películas, previamente, fueron secadas a 50 °C por 24 h, se pesaron y enterraron en los contenedores a una profundidad de 1 cm. Se aspergió agua cada tercer día con la finalidad de conservar la humedad.

Las muestras fueron evaluadas cada 2 semanas durante 10 semanas; para ello, se lavaron con agua destilada y posteriormente se secaron a una temperatura de 50 °C por 24 h, determinando el peso correspondiente.

### **Análisis estadístico**

Los experimentos se analizaron estadísticamente con un diseño completamente aleatorizado. Se realizó un análisis de varianza (A de V) con el programa estadístico Sigma-Statversion 2.03 (Fox et al., 1995), y la comparación de medias con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) (Walpole et al., 1999).

## IV. Resultados y discusión

### 4.1. Composición química y distribución de masa molecular

En la Tabla 10 se presentan los datos relacionados con la composición química y la distribución de la masa molecular del mucílago y la pectina extraídos del nopal.

**Tabla 10. Caracterización química y física del mucílago y pectina de nopales cv. Milpa Alta**

Composición química (% base seca)			Distribución de Peso Molecular	
Parámetro	Mucílago	Pectina	Mucílago (PM, Da)	%
<b>Humedad</b>	11.73 ± 0.137	5.26 ± 0.049	4.1 x 10 <sup>7</sup>	46.67
<b>Proteína</b>	0.99 ± 0.0647	1.87 ± 0.188	1.0 x 10 <sup>6</sup>	49.36
<b>Cenizas</b>	3.69 ± 1.161	4.80 ± 0.982	1.7 x 10 <sup>5</sup>	1.01
<b>Calcio</b>	2.57 ± 0.726	1.67 ± 0.563	3.1 x 10 <sup>4</sup>	2.97
<b>Grasa</b>	2.1 ± 0.361	1.98 ± 0.726		
<b>Carbohidratos</b>	80.41 ± 2.37	86.07 ± 1.73	Pectina (PM, Da)	%
<b>Galactosa</b>	6.17 ± 1.072	7.50 ± 0.861	3.71 x 10 <sup>6</sup>	1.13
<b>Arabinosa</b>	5.21 ± 0.830	12.42 ± 1.14	9.17 x 10 <sup>5</sup>	78.79
<b>Xilosa</b>	4.07 ± 1.037	-	1.60 x 10 <sup>4</sup>	17.91
<b>Ácido galacturónico</b>	0.91 ± 0.0264	67.43 ± 2.8	2.84 x 10 <sup>2</sup>	2.19
<b>Glucosa</b>	34.16 ± 1.720	8.11 ± 0.59		
<b>Ramnosa</b>	-	1.06 ± 0.15		
<b>Grado de esterificación</b>	-	16.19		

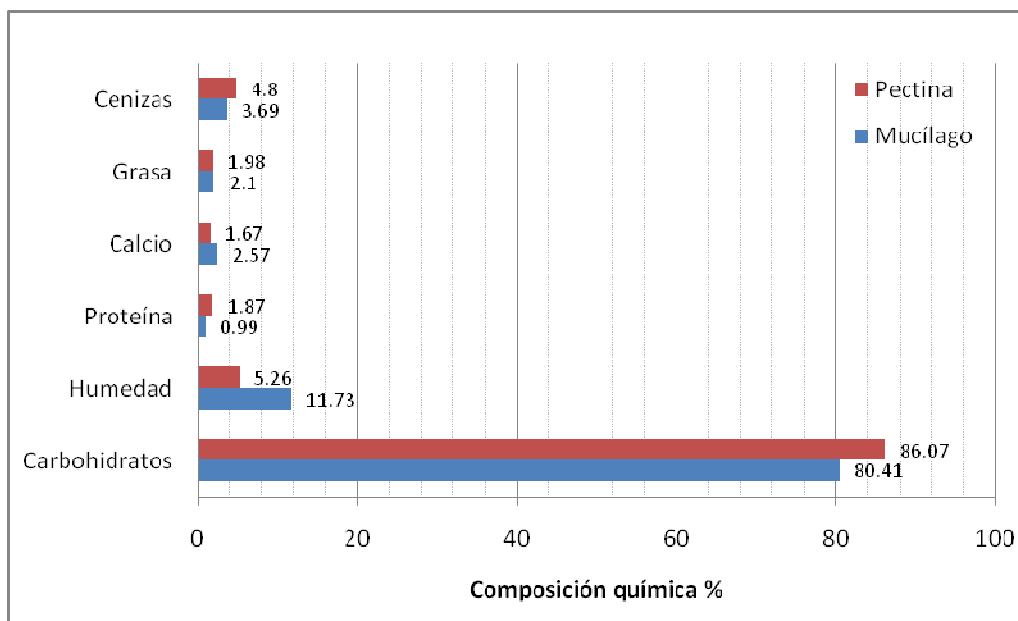
Análisis realizados por triplicado

Una vez extraídos, el mucílago presentó un mayor contenido de humedad y calcio (Gráfica 9); estos valores hacen referencia a que el mucílago en comparación con la pectina presenta mayor capacidad de hidrogel, lo que hace suponer que, en cuanto a su estructura, tiene la

capacidad de formar redes hidrófilas, probablemente, tridimensionales de mayor tamaño que la pectina.

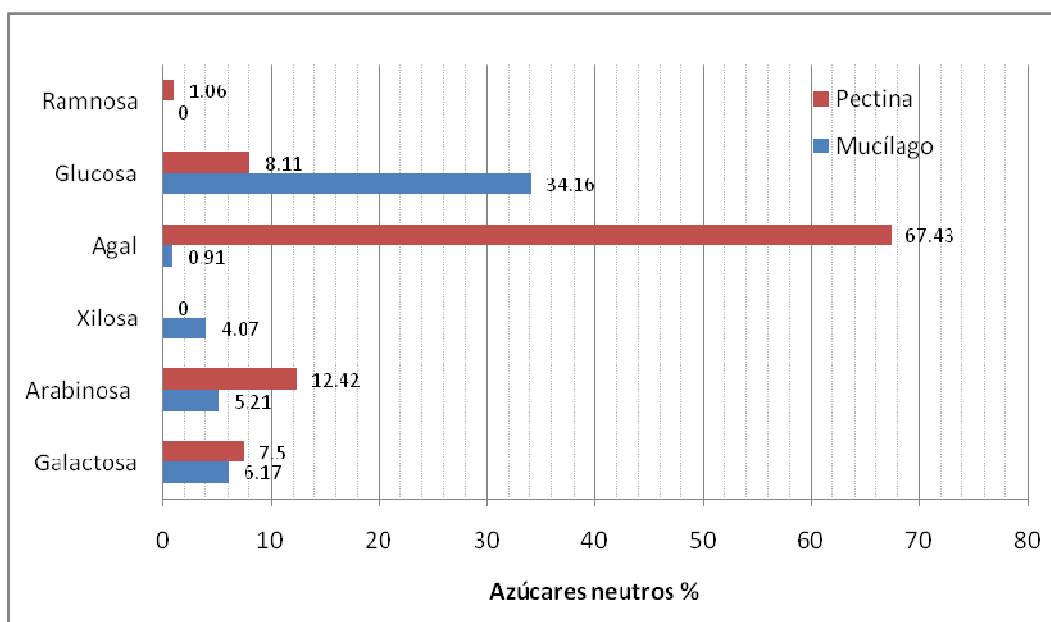
En relación al contenido de proteína y cenizas (Gráfica 9), la pectina en comparación con el mucílago, presentó un mayor contenido de estos parámetros. Para el caso de las cenizas, es importante indicar que, inicialmente, se determinó un contenido de aproximadamente un 25% tanto en la pectina como en el mucílago extraídos, por lo que se realizaron varios lavados con alcohol acidificado con la finalidad de disminuir la concentración de cenizas hasta los valores indicados. Este resultado evidencia la afinidad de estos biopolímeros hacia minerales y proteínas, interacciones que permiten su utilización en el tratamiento de efluentes con elevada concentración de metales pesados (Fox et al., 2012).

**Gráfica 9. Composición química de los biopolímeros de nopal**



Otro aspecto importante es la composición de azúcares neutros que conforman los biopolímeros, quedando establecido que el mucílago no presenta ramnosa en su estructura y la pectina no se conforma por xilosa. Esto lo podemos apreciar en la Gráfica 10.

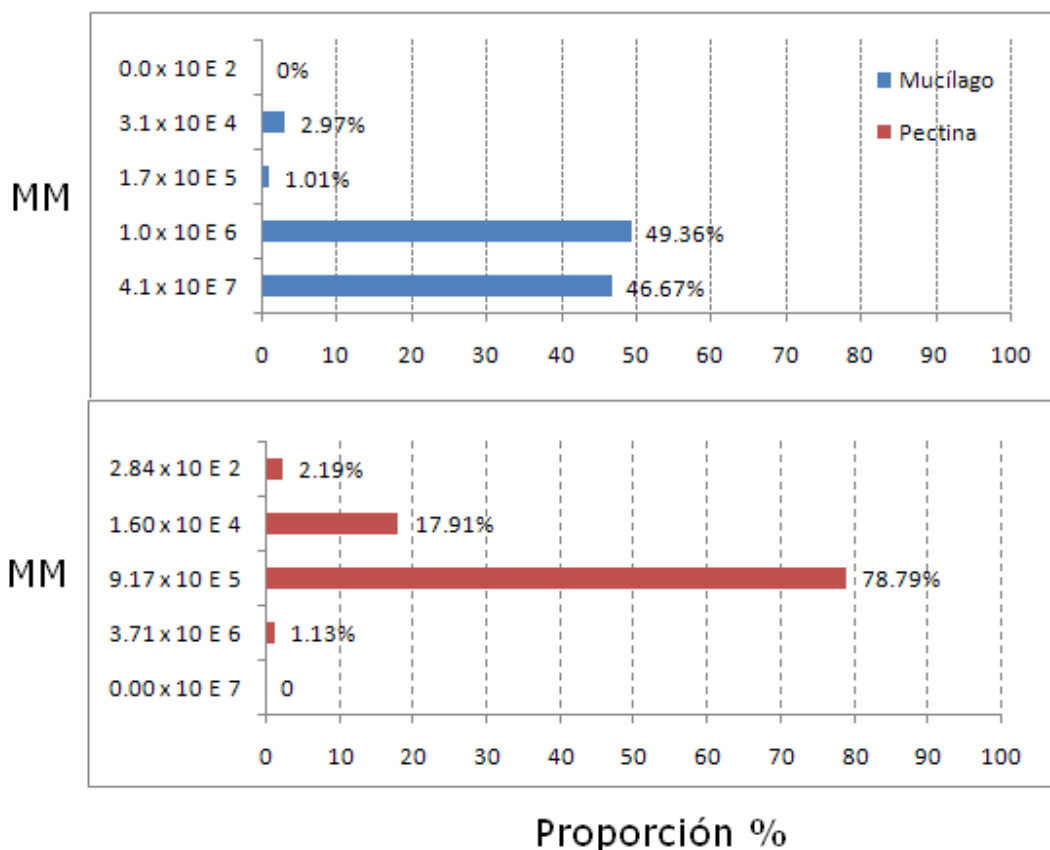
**Gráfica 10. Composición de los azúcares neutros de los biopolímeros**



Estudios previos han reportado que los mucílago están conformados por residuos de ramnosa en diferentes proporciones (Mcgravie y Parolis, 1981), lo cual puede estar definido por la variedad del nopal utilizado en esos estudios.

La distribución de masa molecular indica que el biopolímero de mucílago es de mayor tamaño en comparación con el de pectina, sin embargo, resultó ser menos homogéneo, ya que en la pectina alrededor de un 85% del polímero presenta una masa molecular del orden de  $10^5$  Da, mientras que la distribución de la masa molecular en el mucílago se encuentra en el intervalo de  $10^6$ - $10^7$  Da, en más de un 90%. Esto puede apreciarse en la Gráfica 11.

**Gráfica 11. Distribución de la masa molecular de los biopolímeros**



#### 4.2. Propiedades físicas

En relación al color las películas de mucílago presentan valores de luminancia  $L^*$  superiores a las películas formuladas con pectina (Tabla 11), lo cual indica que las películas formuladas con mucílago son más transparentes (Figura 24).

Los valores de tono angular (hue) para ambas películas formuladas se encuentran dentro del área amarillo-verde en la escala de color, sin embargo las películas de pectina resultaron ser más opacas (Fig. 25). El valor de cromaticidad  $C^*$  resultó ser más saturado para la película de mucílago (16.3). Estos resultados pueden ser debidos a una mejor

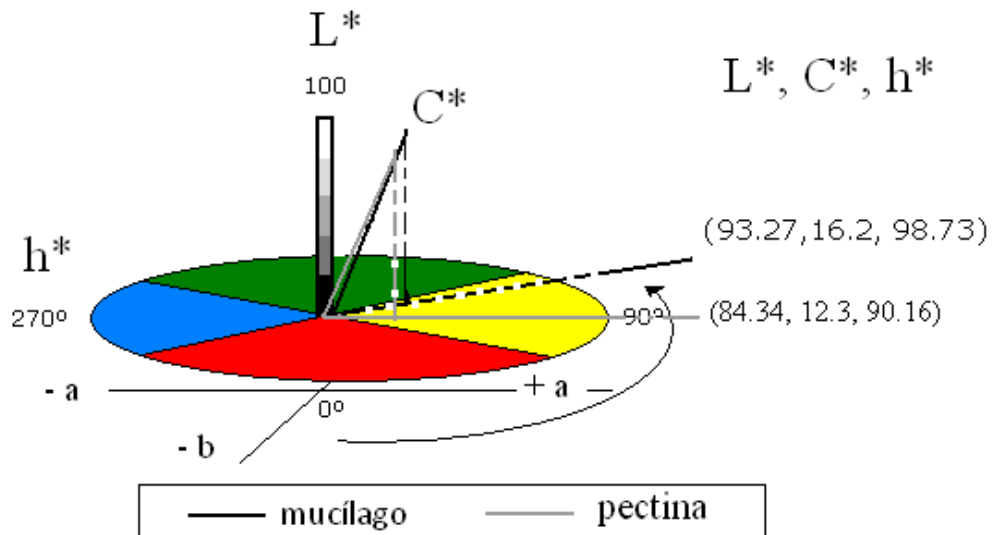
interacción intramolecular incrementando la agregación de las moléculas de mucílago.

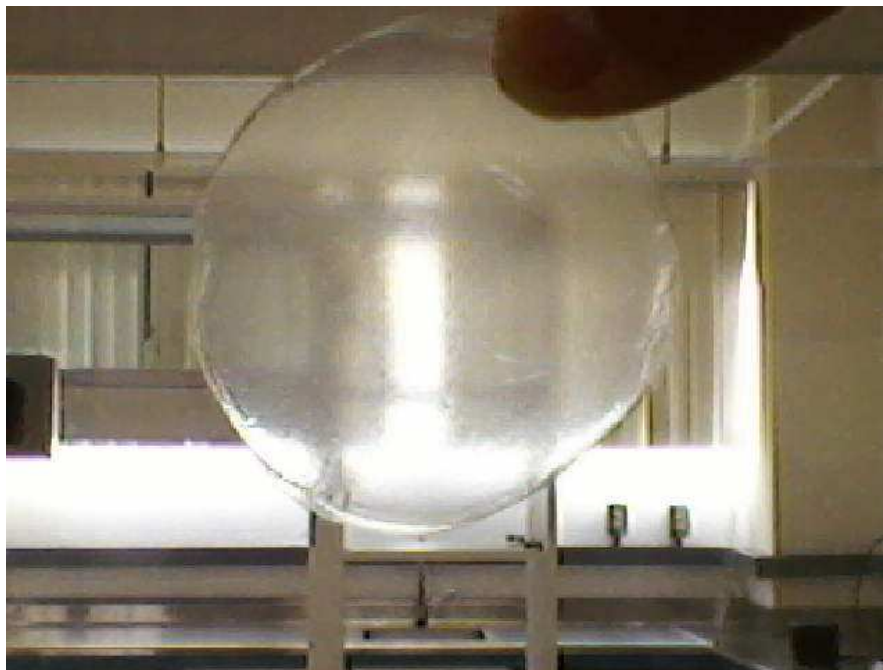
Los resultados antes mencionados se representan en la Gráfica 12, los cuales, corresponden a la escala L\*, C\*, h\*.

**Tabla 11. Características fisicoquímicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal**

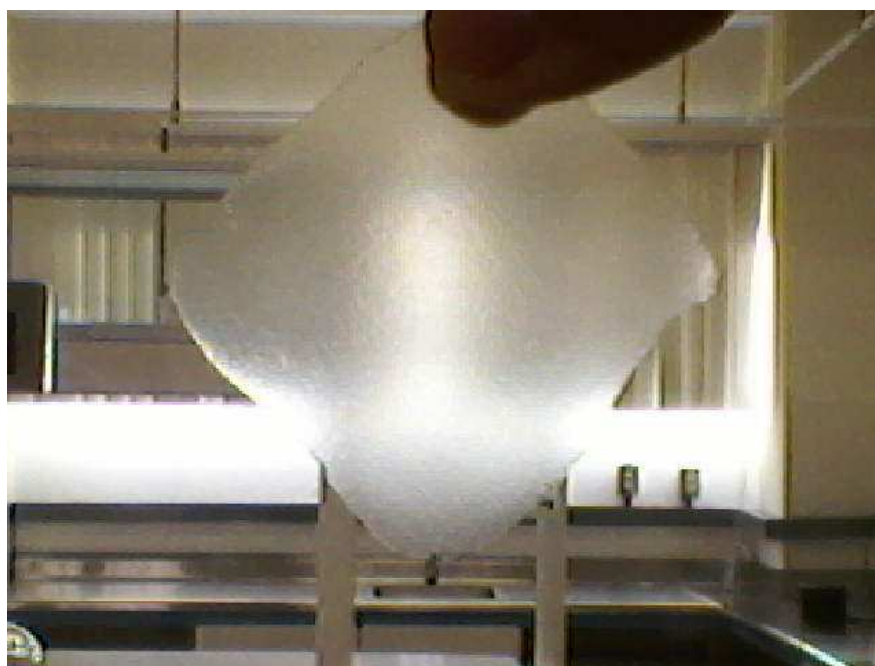
Película	Espesor(m) (x 10 <sup>-4</sup> )	$\rho$ (10 <sup>-4</sup> ) (kg m <sup>-3</sup> )	Color			Humedad (%)
			L	Hue	Croma	
<b>Mucilago</b>	0.8	1.642	93.27 ± 2.81	98.73 ± 4.07	16.2 ± 1.06	78.78 ± 3.49
<b>Pectina</b>	1.2	1.095	84.34 ± 3.17	90.16 ± 2.64	12.3 ± 0.95	56.67 ± 2.93

**Gráfica 12. Representación del color de las películas de nopal**





**Figura 24. Película biodegradable elaborada a base de mucílago**



**Figura 25. Películas biodegradables elaboradas a base de pectina**



### **4.3. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de películas comestibles están directamente relacionadas a su estructura química (Fabra et al., 2010). Los valores de fuerza de tensión dependen de varios factores como lo son el tamaño molecular, las asociaciones intra e intermoleculares, la masa molecular del biopolímero y la distribución de la masa molecular. En la Tabla 12 se muestran los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas de la película, la fuerza de tensión de la película elaborada con mucílago de nopal muestra valores superiores (0.92 MPa) a los de la película elaborada con pectina de nopal (0.57 MPa). Estos resultados concuerdan con lo reportado en estudios anteriores, en los cuales se indica que las propiedades mecánicas son afectadas por el peso molecular del polímero, mostrando un incremento en la fuerza de tensión conforme se incrementa el peso molecular (Lazaridou et al., 2003; Park et al., 1993; Van Soes, 1996).

El porcentaje de elongación al rompimiento (%E) indica la capacidad de la película al estiramiento. Se ha reportado que para películas con estructura suave, la fuerza de tensión se reduce cuando el %E se incrementa y viceversa (Gennadios et al., 1993), sin embargo en películas biodegradables elaboradas a base de proteínas (Gennadios et al., 1993; Cho et al., 2008; Liu et al., 2004; Micard et al., 2000; Walstra et al., 2006), se ha reportado que conforme se incrementa la fuerza de tensión se incrementa el %E. Las películas formuladas con mucílago de nopal presentan un %E mayor en comparación con las películas elaboradas a base de pectina de nopal (Tabla 12). Los resultados obtenidos demuestran que el mucílago permite la formación de estructuras compactas fuertes y mejor organizadas en comparación con la pectina (valores de TS) y que además las películas elaboradas con

mucílago muestran un mayor grado de flexibilidad (%E). Estos resultados indican que no existe la formación de una estructura tridimensional completamente rígida por ambos biopolímeros dentro de la matriz polimérica.

**Tabla 12. Propiedades mecánicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal**

<b>Película</b>	<b>Fuerza de tensión (TS, MPa)</b>	<b>Elongación al rompimiento (% E)</b>	<b>Módulo elástico (EM, MPa)</b>
Mucílago	0.92 ± 0.067	24.96	2.63 ± 1.09
Pectina	0.57 ± 0.028	15.61	1.69 ± 0.86

El módulo elástico (EM) mostró un comportamiento similar al %E (Tabla 12). Este resultado confirma que a pesar del alto peso molecular del mucílago, no se forman estructuras completamente rígidas, lo cual habla de que existe un cierto grado de ramificación que impide la completa interacción entre las estructuras del mucílago. De manera similar, la pectina al tener un menor tamaño el grado de interacción es menor, lo cual genera que la película sea menos flexible, con valores de EM bajos.

#### **4.4. Permeabilidad a los gases**

Los resultados de permeabilidad a los gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y vapor de H<sub>2</sub>O) de las películas elaboradas con mucílago de nopal resultaron ser mayores en comparación con los de películas elaboradas con pectina (Tabla 13). Los valores de selectividad ( $S = \text{PCO}_2 / \text{PO}_2$ ) son de 0.71 y 0.68 para la película elaborada con mucílago y pectina de nopal respectivamente, lo cual indica que estas películas pueden generar una atmósfera modificada pasiva con altos niveles de CO<sub>2</sub> y bajos niveles de

O<sub>2</sub>, lo cual generaría como consecuencia una disminución en el metabolismo de productos hortofrutícolas y con ello un incremento en la vida útil de los mismos. La permeabilidad al vapor de agua de las películas elaboradas con biopolímeros del nopal son superiores a la que presentan las películas elaboradas con poliolefinas ( $0.01-5.6 \times 10^{-11}$  g/msPa), lo cual impide la condensación de vapor de agua en el interior del empaque, evitando con esto la generación de una alta humedad relativa, misma que favorece el desarrollo microbiano.

**Tabla 13. Permeabilidad a los gases de películas elaboradas con biopolímeros de nopal.**

<b>Película</b>	<b>PO<sub>2</sub> (10<sup>9</sup>) (cm<sup>3</sup> / m s Pa)</b>	<b>PCO<sub>2</sub> (10<sup>9</sup>) (cm<sup>3</sup> / m s Pa)</b>	<b>PH<sub>2</sub>O (10<sup>10</sup>) (g / m s Pa)</b>
<b>Mucílago (M)</b>	5.12 ± 0.79	3.67 ± 0.76	2.48 ± 0.87
<b>Pectina (P)</b>	3.65 ± 0.61	2.51 ± 0.41	1.93 ± 0.59

#### **4.5. Propiedades térmicas**

Las propiedades térmicas de las películas elaboradas con los biopolímeros de nopal presentan valores de temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) menor a los -78 °C (Tabla 14), lo que sugiere, que las películas se pueden utilizar en alimentos almacenados a temperaturas de congelación, sin que sus propiedades mecánicas y de barrera se vean modificados. La temperatura de fusión de las películas elaboradas con pectina de nopal resulto ser igual a 71 °C, es decir, menor en comparación con las películas de mucílago, el cual fue de 87.49 °C, esto puede relacionarse con la masa molecular del biopolímero, la cual es menor para la pectina, además, permite definir que estas películas pueden ser utilizadas en cualquier región del mundo en donde el intervalo de temperaturas sea entre -70 °C y 70 °C, sin que se

presenten modificaciones de sus propiedades térmicas y mecánicas. Es importante mencionar que las características de permeabilidad a los gases se ven afectadas por la temperatura, lo cual debe ser considerado durante el empaqueo de un producto con empaques elaborados a base de biopolímeros de nopal.

**Tabla 14. Propiedades térmicas de películas elaboradas con biopolímeros de nopal.**

<b>Película</b>	<b>T<sub>g</sub></b> (°C)	<b>T<sub>m</sub></b> (°C)	<b>ΔH<sub>g</sub></b> (J/g)	<b>ΔH<sub>m</sub></b> (J/g)
<b>Mucílago (M)</b>	-83.54 ± 3.17	87.49 ± 1.19	7.53 ± 0.63	45.26 ± 0.49
<b>Pectina (P)</b>	-78.08 ± 2.46	71.14 ± 0.87	0.66 ± 0.05	26.53 ± 4.46

La entalpía de transición vítrea ( $\Delta H_g$ ) y de fusión ( $\Delta H_m$ ) (Tabla 14) es mayor para la película elaborada con mucílago de nopal en comparación con la de pectina, lo cual indica que existe una estructura cristalina con cierto grado de orden, esto coincide con organizaciones conformadas por polímeros de mayor peso molecular, en comparación con los arreglos generados por las pectinas en donde estructuras amorfas conformadas por polímeros de bajo peso molecular son las que predominan.

#### **4.6. Degradabilidad**

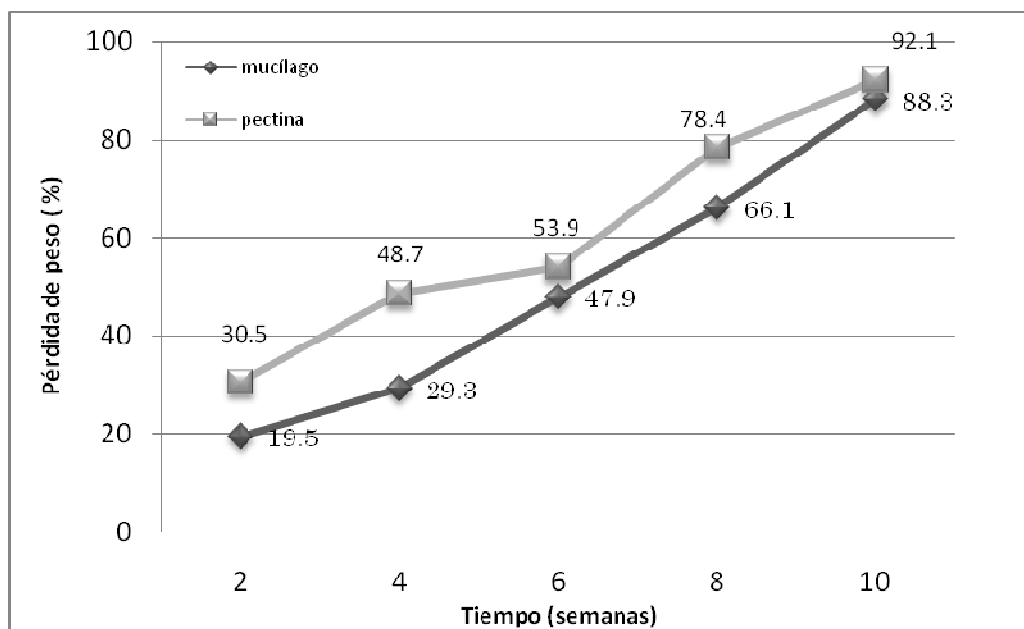
Conforme a los datos obtenidos de la pérdida de peso de las películas por exposición a tierra, se estima que la total degradación de las películas formuladas con los biopolímeros del nopal se lleva a cabo en un periodo de 3 meses, como se puede apreciar en los resultados de la Tabla 15 y de la Gráfica 13.

**Tabla 15. Biodegradación de películas a base de polímeros de nopal**

Pérdida de peso (%)		
Semanas	Película-Mucílago	Película-Pectina
<b>2</b>	19.5 ± 1.28	30.5 ± 2.81
<b>4</b>	29.3 ± 2.47	48.7 ± 3.65
<b>6</b>	47.9 ± 3.29	53.9 ± 4.81
<b>8</b>	66.1 ± 5.11	78.4 ± 6.12
<b>10</b>	88.3 ± 3.74	92.1 ± 7.12

Análisis realizados por triplicado

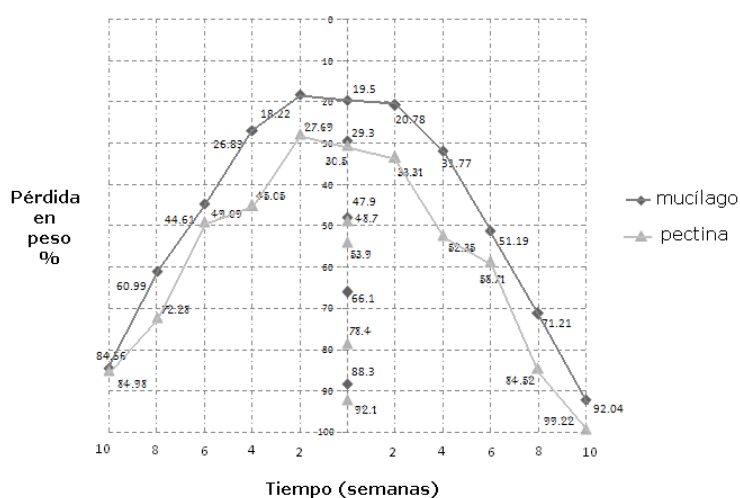
**Gráfica 13. Evaluación de la biodegradación de las películas de nopal**



La biodegradabilidad para la película elaborada con pectina de nopal fue mayor en comparación con la elaborada con mucílago (Gráfica 14), esto coincide nuevamente con las estructuras amorfas generadas por las pectinas (polímeros de bajo peso molecular), las cuales son degradadas fácilmente por los componentes del medio; los microorganismos presentes asimilan el material provocando la ruptura de los grupos funcionales que puede suceder, ya sea, en la cadena principal o en los sustituyentes laterales, los cuales son aprovechados como fuentes de energía.

Para el caso de las películas de mucílago que por ser de mayor masa molecular presentan mayor resistencia, esto coincide nuevamente con la existencia de una estructura cristalina con cierto grado de orden que posee una mayor interacción molecular, que está mejor organizada y, por lo tanto, es fuerte y compacta, por lo que presenta una mayor resistencia a la asimilación bacteriana y por lo tanto una menor degradación.

**Gráfica 14. Proceso de biodegradación de las películas de nopal**



La comparación de estos resultados con los obtenidos para otras películas formuladas con polisacáridos es compleja, debido a que la simulación in vitro del medio de degradación es específica en cada una de las investigaciones. Algunos factores como la concentración y los componentes de cada película, influyen en el tiempo de degradación de la misma. Por ejemplo, las películas hechas a base de quitina a la misma concentración, presentan diferente tiempo de degradación, esto como resultado del proceso de obtención y activación de la quitina, además de la utilización de diferentes técnicas para evaluar la biodegradabilidad de las películas (Parameswara, P. et al., 2012). Se ha reportado que las películas elaboradas a base de polisacáridos extracelulares producidos por *Pseudomonas oleovorans* se degradan completamente en 28 días. Sin embargo, en este estudio se utilizó un medio enriquecido que favorecía el desarrollo de bacterias (Alves V., et al., 2010).

## **V. Conclusiones**

Se logró generar películas 100% biodegradables formuladas con mucílago y pectina de nopal (polisacáridos presentes en el nopal).

De acuerdo con las características fisicoquímicas, las películas elaboradas resultaron ser transparentes (lo cual permite ver al producto), flexibles y presentan una adecuada resistencia para ser utilizadas como material de empaque.

Con base en las propiedades mecánicas: porcentaje de elongación (%E), fuerza de tensión y el módulo elástico las películas elaboradas con mucílago en comparación con las elaboradas con pectina de nopal presentan mayor flexibilidad, mayor resistencia y mayor plasticidad.

Las películas elaboradas con mucílago presentan mayor permeabilidad a los gases ( $O_2$ ,  $CO_2$  y vapor de  $H_2O$ ), en comparación con las películas elaboradas con pectina; esto indica que durante su aplicación en el empaque de productos hortofrutícolas, se podrían generar en el interior atmósferas con una elevada concentración de  $CO_2$  y bajos niveles de oxígeno, lo que conlleva a retardar la maduración del producto. Valores mayores de permeabilidad al vapor de agua, impiden la acumulación de agua condensada, por lo que el desarrollo microbiano se ve desfavorecido.

Con respecto a las propiedades térmicas, ambas películas pueden ser utilizadas para el empaque de alimentos en refrigeración y congelación, sin que se vean alteradas sus propiedades mecánicas y de permeabilidad.

Para el caso de la biodegradabilidad las películas elaboradas con pectina en comparación con las elaboradas con mucílago de nopal,



presentan mayor pérdida de peso, por tanto mayor degradación, lo que indica que se biodegradarían en periodos más cortos que las de mucílago. En general, las pruebas de degradabilidad de las películas elaboradas, arrojaron tiempos de biodegradación cortos, por lo tanto ambas películas no representan un impacto en la acumulación de residuos sólidos, rellenos sanitarios y/o rellenos de tierra controlada.

### **Conclusión personal**

El presente estudio, me brindó la oportunidad de aplicar los conocimientos de ingeniería química para participar en la concepción de un proyecto que busca el uso óptimo de los recursos ofreciendo un producto de utilidad que tiene impacto en el medio ambiente, el logro de este objetivo fue el desarrollo de una tecnología que elaboró un producto que presenta varias ventajas que son primordiales en la ingeniería básica de un proyecto, lo que me motiva a buscar nuevos retos tanto profesionales como personales. Así mismo, me permitió desarrollar un perfil multidisciplinario que involucra diversas áreas del conocimiento orientado a la biotecnología, que en la actualidad ha tenido mayor auge, ya que esta carrera, en este sentido, es ilimitada gracias a una de las bases fundamentales que se aplican en cualquier campo:

“La materia no se crea ni se destruye sólo se transforma... Lavoisier.”

Compaginado a esto, el desarrollo del presente me hizo asumir el compromiso profesional y personal que me compete, al contribuir en la búsqueda de la sostenibilidad y sustentabilidad que nos pertenece a todos.

Definitivamente, por todo lo que representa, fue una excelente decisión aceptar este proyecto.

## **Futuras investigaciones**

Actualmente se están formulando películas elaboradas con una mezcla de pectina-mucílago de nopal y además se están evaluando la adición de micro emulsiones elaboradas a base de cera de candelilla y cera de abeja con la finalidad de disminuir la permeabilidad al vapor de agua en las películas.

## **Agradecimientos**

Queremos agradecer el apoyo otorgado por la Secretaría de Investigación y Posgrado mediante el apoyo de Fomento Académico a la Investigación (FAI) otorgado **C10-FAI-05-18.45**, mediante el impulso al aprovechamiento integral del nopal. En lo sucesivo se darán los créditos correspondientes en la publicación de artículos y presentación de los resultados en congresos.

## **VI. Referencias bibliográficas**

### **6.1. Bibliografía**

- American Society for Testing and Material. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric): ASTM D 638M-93. Philadelphia. (1993)
- Association of Official Analytical Chemists. AOAC 934.05. Gaithersburg, Maryland USA. (2005)
- Cho MJ., Shen R. and Mooshegian R.** (2008).U.S.A. Patent 7332192
- Fox EK., Shotton and Ulrich C.** Sigma-Stat User Manual. San Rafael, CA., USA, Jandel Scientific Co. (CD). (1995)
- Griffin JL.** British Patent 1,586,344 (1973)
- Guevara AJC.** Empacado de alimentos. 1ª Edición. Trillas. México. pp. 42-77 (2010)
- Guevara AJC.** Tecnología Postcosecha y Aspectos Biofuncionales del Nopal y la Tuna. 1a Edición. Editorial Trillas. México (2012)
- International Organization for Standardization. ISO 11292: 1995. Switzerland
- Izydorczyk M., Cui SW. and Wang Q.** Polysaccharide gums: Structures, functional properties and applications. pp 263-307. In: Food Carbohydrates Chemistry, Physical properties and applications. Cui S. W. ed., Boca Raton Taylor and Francis Group. (2005)
- MINCETUR. Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. Guía de envases y embalajes. 1ª Edición. pp. 32-39. (2009)
- Morton J.** Procesamiento de Plásticos. LIMUSA. 1ª. Edición. pp. 13-43. ISBN: 9789681844349
- Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. RAC. Diccionario Esencial de las Ciencias. ESPASA. España. pp. 746 (2001)
- Van Soes JJG.** Starch plastics: structure property relationships. PhD Thesis, Univ. of Wageningen, Holland (1996)
- Walpole ER., Myers HR. and Myer LS.** Probabilidad y Estadística para Ingenieros. pp. 481-482. Sexta edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A., México (1999)
- Walstra P.** Physical chemistry of foods. pp. 137-201. New York; Mercel Dekker (2005)
- Walstra P., Wouters JTM. and Geurts TJ.** Dairy science and technology. pp. 17-108. Boca Raton, Fla.: CRC Press (2006)

## 6.2. Hemerografía

- Alvesa VD., Ferreira AB., Costa N., Freitas F., Reis MAM. and Coelho IM.** Characterization of biodegradable films from the extracellular polysaccharide produced by *Pseudomonas oleovorans* grown on glycerol byproduct. *Carbohydrate Polymers*. 83: 1582-1590 (2011)
- Amin ES., Awad O. and El-Sayed M.** The mucilage of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Research*, 15: 159–161 (1970)
- Bradford MM.** A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*. 72: 248-254 (1976)
- Cai W., Gu X. and Tang J.** Extraction, purification, and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*. *Carbohydr Polym*. 71: 403-10 (2008)
- Guowuyuan.** China Issues Policies to Promote Development of Its Bio Industry. *China Chemical Reporter*, 20 (19): 7 (2009)
- Dalev PG. and Patil RD.** Mark, J.E., Vassileva, E., Fakirov, S. Biodegradation of chemically modified gelatin films in soil. *Journal of Applied Polymer Science* 78 (7): 1341–1347 (2000)
- Segura D., Noguez R. y Espín.G.** Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *Biotecnología*. 14(3): 361-372 (2007)
- Dias AB., Müller CMO., Larotonda FDS. and Laurindo B.** Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *Journal of Cereal Science*, 51 (2): 213-219 (2010)
- Fabra MJ., Talens P. and Chiralt.** A. Influence of calcium on tensile, optical and water vapour permeability properties of sodium caseinate edible films. *J Food Eng*. 96: 356-364 (2010)
- Filisetti C. TMCC. and Carpita NC.** Measurement of uronic acids without interference from neutral sugars. *Anal. Biochem*. 197:157-162 (1991)
- Fishman ML., Pfeffer PE., Barford RA. and Doner LW.** Studies of pectin solution properties by high-performance size exclusion chromatography. *J. Agric Food Chem*. 32: 372-378 (1984)
- Forni E., Penci M. and Polessello A.** A preliminary characterization of some pectins from quince (*Cydonia oblonga* Mill.) and prickly pear (*Opuntia ficus indica*) peel. *Carbohydrate Polymers*, 23: 231–234 (1994)
- Fox DI., Pichler T., Yeh DH., and Alcantar NA.** Removing Heavy Metals in Water: The Interaction of Cactus Mucilage and Arsenate (As [V]), *Environ. Sci. Technol*. 46 (8), pp. 4553–4559 (2012)
- Gennadios A., Brandenburg AH., Weller CL. and Testinll RF.** Effect of pH on properties of wheat gluten and soy protein isolate films. *J. Agric Food Chem*. 41: 1835-1839 (1993)

- Goycoolea F. and Cárdenas A.** Pectins from *Opuntia* spp.: a short review. *J. Profess Assoc Cactus Develop.* 5: 17-19 (2003)
- Guevara AJC. and Yahia EM.** Physicochemical changes of prickly pear cactus stems under passive and semi-active modified atmosphere packaging. *Acta Horticulturae.* 811 (1): 91-96 (2009)
- Guevara AJC.** Efectos Biofuncionales del Nopal y la Tuna. *Horticultura Internacional.* Septiembre.71: 18-23 (2009)
- Guevara AJC., Yahia EM. Cedeño L. and Tijsken LMM.** Modeling effects of temperature and relative humidity on gas exchange of prickly pear cactus (*Opuntia* spp.) stems. *Food Science and Technology. Lebensm.-Wiss.U-Technol.* 39 (7): 796-805 (2006)
- Habibi Y., Mahrouz M. and Vignon MR.** Isolation and structural characterization of protopectin from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruit. *Carbohydr Res.* 339: 119-1127 (2005b)
- Villada SH., Harold AA. y Velasco RJ.** Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. *TEMAS AGRARIOS.* 12(2): 5-13 (2007)
- Lazaridou A., Biliaderis CG. and Kontogiorgos V.** Molecular weight effects on solution rheology of pullulan and mechanical properties of its films. *Carbohydr Polym* 52:151-166 (2003)
- Liu CC., Tellez GAM. and Castell PME.** Physical and mechanical properties of peanut protein films. *LebensmWissenTechnol,* 37: 731-738 (2004)
- Cedeño LMM., Guevara AJC. y Yahia EM.** Desarrollo de un modelo matemático para predecir la atmósfera en empaques de alimentos. (2006)
- Majdoub H., Picton L., Le Cerf G. and Roudesli S.** Water retention capacity of polysaccharides from prickly pear nopals of *Opuntia ficus indica* and *Opuntia Litoralis*: Physical-Chemical Approach. *J Polym Environ.* 18: 451-458 (2010)
- Majdoub H., Roudesli S. and Deratini A.** Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behavior. *Polym Int.* 50: 552-560 (2001b)
- Majdoub H., Roudesli S., Picton L., Le Cerf D., Muller G. and Grisell M.** Prickly pear nopals pectin from *Opuntia ficus-indica* physico-chemical study in diluted and semi-diluted solutions. *Carbohydr Polym.* 45: 69-79 (2001a)
- McGarvie D. and Parolis H.** The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Res.* 69: 171-179 (1979)
- McGarvie D. and Parolis H.** The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydratae Reserch.* 88: 305 (1981)
- McGarvie D. and Parolis H.** Methylation analysis of the mucilage of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Research.* 88: 305-314 (1981a)

- McGarvie D. and Parolis H.** The acid-labile peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate Research*. 94: 57–65 (1981b)
- Medina TLE., De La Fuente B., Torrestiana SB. and Katthain R.** Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids*. 14:417-24 (2000)
- Micard V., Belamri R., Morel MH. and Guilbert S.** Properties of chemically and physically treated wheat gluten films. *J Agric Food Chem*. 48: 2948-2953 (2000)
- MMA.** Medición del color. *La Guía Metas. Metas y Metrólogos Asociados*. 1-12 (Junio 2009)
- Mohnen D.** Pectin structure and biosynthesis. *Curr Opin Plant Biol*. 11: 266-277 (2008)
- Nadiadid JE., Sobral PJA. and Menegalii FC.** Development of films based on blends of *Amaranthus cruentus* flour and poly (vinyl alcohol). *Carbohydrate polymers*, 75 (4): 592-598 (2009)
- Nobel PS., Cacelier J. and Andrade JL.** Mucilage in cacti: Its aplostatic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*. 43: 641–648 (1992)
- Parameswara P., Demappa T., Mahadevaiah, Prakash Y., Somashekarappa H., Byrappa K. and Somashekar R.** Polymeric degradation of water soluble chitosan/HPMC films using WAXS data. *Materials Research Innovations*, 16 (2): 126-129 (2012)
- Paredes LO., Bello PLA. and López MG.** Amylopectin structural gelatinization and retrogradation studies. *Food Chemistry*, 50: 411-418 (1994)
- Park HJ., Weller CL., Vergano PJ. and Testin RF.** Permeability and mechanical properties of cellulose-based edible films. *J Food Science*. 58:1361-1364 (1993)
- Paulsen BS., and Lund SP.** Water soluble polysaccharides of *Opuntia ficus indica*. *Phytochemistry*, 18, 569–571 (1979)
- Quintero CJI., Falguera VII. y Muñoz HA.** Películas y recubrimientos comestibles: importancia y tendencias recientes en la cadena hortofrutícola. *Tumbaga*. 5: 93-118 (2010)
- Reyes AJA.** El nopal. Un icono de la patria. *Relatos e Historia de México*. Editorial Raíces, 33, 28-33 (2011).
- Sepúlveda E., Sáenz C., Aliaga E. and Aceituno C.** Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *J Arid Environ*. 68: 534-545 (2007)
- Trachtenberg SH. and Mayer A.** Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 21:2835-2843 (1982)
- Trachtenberg SH. and Mayer AM.** Composition and properties of *Opuntia ficus indica*. *Phytochemistry*. 20, 2665-2668 (1981)

- Siracusa V., Rocculi P., Romani S. and Dalla RM.** Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trend in food Scienci and Tecnology*. 19: 634-643 (2008)
- Vargas TA., Zamudio FPB., Salgado DR. and Bello PLA.** Biodegradation of low-density polyethylene-banana starch films. *Journal of Applied Polymer Science*. 110: 3464-3472 (2008)
- Vargas TA., Zamudio FPB., Salgado DR. and Bello PLA.** Morphological, Thermal, and Mechanical Studies of Film Elaborated with the Blend Low-Density Polyethylene and Chemical-Modified Banana Starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 106: 3994-3999 (2007)
- Voragen AGJ., Coenen AJ., Verhoef RP. and Schols HA.** Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell wall. *Struc Chem*. 2: 263-275 (2009)
- Willats WGT., Knox PJ. and Mikkelsen JD.** Pectin: new insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Sci and Tech*. 17: 97-104 (2006)
- Shen XL., Wu JM., Chen Y. and Zhao G.** Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan. *Food Hydrocolloids*. 24 (4): 285-290 (2010)

### 6.3. Mesografía

- Arzate A.** Opuntia, Nopalea (Nopal). Disponible en: <http://bitly.com/Rrbyqt>
- Ávila PJ.** México Heráldico. El “Nopal” Genealógico. Disponible en: <http://bit.ly/UJU1P4>  
Acceso: Oct. 15, 2012
- BioBasic's. Government of Canada. Biopolymers and Bioplastics. Disponible en: <http://bitly.com/PmpSUQ> Acceso: Oct. 15, 2012
- Centro de información y Comunicación Ambiental de Norte América, A.C. Saber más... Petróleo. Disponible en: [www.ciceana.org.mx](http://www.ciceana.org.mx) Acceso: Oct. 15, 2012
- Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. CONABIO. Banco de Imágenes. Disponible en: <http://bit.ly/PK0Xqv> Acceso: Oct. 15, 2012
- Eleno BA.** Propiedades básicas de los polímeros. (2004). Disponible en: <http://bitly.com/P7065A> Acceso: Oct. 15, 2012
- Ermácora MR.** Unidad 1. POLÍMEROS BIOLÓGICOS. Disponible en: <http://bit.ly/TdwQGt> Acceso: Oct. 15, 2012
- Frias AC., Izema I. y Gavilán GA.** Instituto Nacional de Ecología. Situación de los envases plásticos en México. Disponible en: <http://bit.ly/RjvqOr> . Acceso: Oct. 15, 2012
- Generalidades sobre polímeros. Disponible en: <http://bitly.com/U0i5YA> Acceso: Oct. 15, 2012
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente. Disponible en: <http://bitly.com/c39KtKn> Acceso: Oct. 15, 2012

- López CF.** Fundamentos de polímeros. (2004). Disponible en: <http://bitly.com/TJiKgG>  
Acceso: Oct. 15, 2012
- Meza R.JL.** Polímeros. Disponible en : <http://bitly.com/Vsc7Rr> Acceso: Oct. 15, 2012
- Noguez X.** *Códice Techialoyan García Granados* . Disponible en: <http://bit.ly/RZWGPv>  
Acceso: Oct. 15, 2012
- Organisation for Economic Cooperation and Development OECD, Enviromental Statistics Data, Compendium 2006-2008. Disponible en: <http://bit.ly/abfKH1> Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. El Medio Ambiente en México 2009. pp. 48-51. Disponible en: <http://bitly.com/PuISAA> Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. Informe de la situación actual del Medio Ambiente en México 2008. pp. 325-359. Disponible en: <http://bitly.com/PuISAA> Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. Modulo de consulta temática. Residuos Sólidos Urbanos. Disponible en: <http://bitly.com/UKgvQ0>  
Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. Modulo de consulta temática. Generación estimada de residuos sólidos urbanos por zona geográfica. Disponible en: <http://bitly.com/U0AHaW> Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Semarnat. Modulo de consulta temática. Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad. Disponible en: <http://bitly.com/VLeRPA> Acceso: Oct. 15, 2012
- Secretaría del Medio Ambiente. Dirección de Proyectos de Agua, Suelo y Residuos. El PET y su situación actual en el Distrito Federal. Disponible en: <http://bitly.com/RjyY32>  
Acceso: Oct. 15, 2012
- Universidad de Oviedo. Tema 3. Efectos de la temperatura. Transición vítrea disponible en: <http://bit.ly/RME4D7> Acceso: Oct. 15, 2012
- Zamora A.** Carbohidratos o Glúcidos – Estructura Química. Disponible en: <http://bit.ly/RrDvys> Acceso: Oct. 15, 2012