



# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Oaxaca  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE OAXACA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA**

**TESIS**

**DESARROLLO DE PELÍCULAS COMESTIBLES, A BASE DE MUCÍLAGO DE  
NOPAL, CON ALTA RESISTENCIA TÉRMICA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:**

**ISAAC NERI ROJAS**

**ASESORA:**

**M. C. AYMARA JUDITH DÍAZ BARRITA**

**COMISIÓN REVISORA:**

**DRA. MARÍA DE JESUS RAMÍREZ ALTAMIRANO**

**M. C. MARIO DÍAZ GONZÁLEZ**

**M. I. MARCO ANTONIO MALDONADO NÚÑEZ**

OAXACA DE JUÁREZ, OAXACA

SEPTIEMBRE, 2022

## **Agradecimientos**

A la M. C. Aymara Judith Díaz Barrita por darme la oportunidad de realizar este proyecto de residencia profesional y por sus conocimientos, confianza y apoyo brindado durante el periodo escolar.

A la Dra. María de Jesús Ramírez Altamirano por su confianza, apoyo y todas las enseñanzas que me brindó y darme la facilidad de trabajar en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Al Tecnológico Nacional de México Campus Oaxaca por llevar a cabo mi formación académica de la carrera de Ingeniería Química.

Al personal docente del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Oaxaca por mi formación profesional y personal adquirido en mis cuatros años de estancia escolar.

A mis padres Oliverio Neri López y Magdalena Rojas Lázaro y a mi hermano Oliverio Neri Rojas por su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros de clase por apoyarme de manera incondicional y por los buenos momentos que pasamos durante la carrera universitaria.

## Resumen

Con el fin de solucionar los problemas generados por los residuos plásticos, se han realizado esfuerzos en la investigación para obtener materiales amigables con el medio ambiente. En consecuencia, los polímeros naturales o biopolímeros han recibido mucha atención debido a estas preocupaciones ambientales. Dentro de estos materiales, se encuentran los recubrimientos y las películas comestibles. Ambos pueden ser definidos como una o más capas delgadas y continuas compuestas por materiales que pueden ser ingeridos por el consumidor (Guo *et al.*, 2014).

El uso de películas y recubrimientos comestibles en alimentos, evitan la pérdida o ganancia de humedad que provoca una modificación en su textura y turgencia, retardan los cambios químicos como el color, aroma y valor nutricional, ya que actúan como barrera contra el intercambio de gases que influye en la estabilidad química y microbiológica, además de evitar el daño mecánico por manipulación (McHugh, 2000).

Se elaboraron películas comestibles a base de mucílago de nopal, glicerol, polietilenglicol e hidroxietilcelulosa (M1-0.8, M2-1.0 y M3-1.5). Cada formulación se preparó por triplicado y se evaluaron las siguientes propiedades físicas: espesor, solubilidad y permeabilidad al vapor de agua; propiedades superficiales como la adherencia; y propiedades térmicas como la resistencia térmica de las películas comestibles.

Los resultados obtenidos mostraron que la película comestible M3-1.5 presentó mayor espesor ( $0.35375\text{ mm}$ ), mayor resistencia térmica ( $24.0659\%$ ) a una temperatura de  $95^{\circ}\text{C}$ , menor solubilidad ( $66.9957\%$ ), aunque presentó una mayor permeabilidad al vapor de agua ( $2.4379 \times 10^{-03} \frac{\text{gmm}}{\text{hm}^2\text{Pa}}$ ). La adherencia sobre una lámina a base de hojas de elote fue buena.

## ÍNDICE

|                                            | Página    |
|--------------------------------------------|-----------|
| Índice de Figuras .....                    | 9         |
| Índice de Cuadros .....                    | 10        |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                  | <b>11</b> |
| <b>OBJETIVOS</b> .....                     | <b>13</b> |
| Objetivo General.....                      | 13        |
| Objetivos Específicos.....                 | 13        |
| <b>JUSTIFICACIÓN</b> .....                 | <b>14</b> |
| <b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO</b> .....     | <b>15</b> |
| 1.1 Polímeros.....                         | 15        |
| 1.1.1 Generalidades.....                   | 15        |
| 1.1.2 Clasificación de los polímeros ..... | 15        |
| 1.2 Biopolímeros.....                      | 17        |
| 1.2.1 Generalidades.....                   | 17        |
| 1.2.2 Clasificación de biopolímeros. ....  | 18        |
| 1.2.3 Celulosa .....                       | 19        |
| 1.2.3.1 Generalidades.....                 | 19        |
| 1.2.4 Hidroxietilcelulosa .....            | 21        |
| 1.2.4.1 Generalidades.....                 | 21        |
| 1.2.4.2 Datos fisicoquímicos .....         | 23        |
| 1.2.4.3 Propiedades y usos.....            | 23        |

## ÍNDICE (continuación)

|                                                              | Página |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| 1.2.4.4 Consistencia .....                                   | 24     |
| 1.2.4.5 Incompatibilidades .....                             | 24     |
| 1.2.5 Nopal.....                                             | 24     |
| 1.2.5.1 Generalidades.....                                   | 24     |
| 1.2.5.2 Clasificación botánica.....                          | 26     |
| 1.2.5.3 Descripción morfológica .....                        | 27     |
| 1.2.6 Mucílago de nopal .....                                | 28     |
| 1.2.6.1 Generalidades.....                                   | 28     |
| 1.2.6.2 Propiedades del mucílago de nopal .....              | 30     |
| 1.2.6.3 Usos del mucílago.....                               | 30     |
| 1.2.6.4 Extracción del mucílago y rendimientos .....         | 32     |
| 1.3 Películas comestibles.....                               | 34     |
| 1.3.1 Generalidades.....                                     | 34     |
| 1.3.2 Películas a base de biopolímeros.....                  | 36     |
| 1.3.3 Plastificantes .....                                   | 38     |
| 1.3.1.1 Glicerol.....                                        | 38     |
| 1.3.1.2 Polietilenglicol-4000 .....                          | 38     |
| 1.3.4 Propiedades físicas de las películas comestibles ..... | 39     |
| 1.3.4.1 Espesor.....                                         | 39     |

## ÍNDICE (continuación)

|                                                                                       | Página    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.4.2 Solubilidad .....                                                             | 39        |
| 1.3.4.3 Permeabilidad .....                                                           | 40        |
| 1.3.5 Propiedades superficiales de las películas comestibles.....                     | 41        |
| 1.3.5.1 Adherencia.....                                                               | 42        |
| 1.3.6 Propiedades térmicas de las películas comestibles.....                          | 42        |
| 1.3.6.1 Resistencia térmica.....                                                      | 43        |
| 1.4 Envases biodegradables .....                                                      | 43        |
| 1.4.1 Definición de envases compostables y biodegradables.....                        | 43        |
| 1.4.2 Características de los envases biodegradables.....                              | 43        |
| 1.4.3 Ventajas y desventajas del de envases biodegradables.....                       | 44        |
| 1.5 Vasos biodegradables.....                                                         | 46        |
| 1.5.1 Formato y comercialización .....                                                | 46        |
| 1.5.2 Hoja de maíz .....                                                              | 47        |
| 1.5.2.1 Generalidades.....                                                            | 47        |
| 1.5.2.2 Composición de las hojas de maíz .....                                        | 48        |
| 1.5.2.3 Descripción de los elementos que conforman a la hoja de mazorca de maíz ..... | 48        |
| <b>CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>                                     | <b>49</b> |
| 2.1 Obtención de películas comestibles a base de mucílago de nopal.....               | 49        |
| 2.1.1 Extracción y rendimiento del mucílago de nopal.....                             | 49        |

## ÍNDICE (continuación)

|                                                                                                 | Página    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.2 Formulación de películas comestibles .....                                                | 51        |
| 2.1.3 Elaboración de películas comestibles .....                                                | 52        |
| 2.2 Evaluación de propiedades físicas, superficiales y térmicas de las películas comestibles... | 55        |
| 2.2.1 Evaluación de propiedades físicas .....                                                   | 55        |
| 2.2.1.1 Espesor .....                                                                           | 55        |
| 2.2.1.2 Solubilidad .....                                                                       | 55        |
| 2.2.1.3 Permeabilidad al vapor de agua .....                                                    | 56        |
| 2.2.2 Evaluación de propiedades superficiales .....                                             | 58        |
| 2.2.2.1 Adherencia .....                                                                        | 58        |
| 2.2.3 Evaluación de propiedades térmicas .....                                                  | 58        |
| 2.2.3.1 Resistencia térmica .....                                                               | 58        |
| <b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>                                                           | <b>60</b> |
| 3.1 Películas comestibles a base de mucílago de nopal .....                                     | 60        |
| 3.1.1 Rendimiento de mucílago de nopal .....                                                    | 60        |
| 3.1.2 Obtención de las películas comestibles .....                                              | 60        |
| 3.2 Propiedades físicas, superficiales y térmicas .....                                         | 64        |
| 3.2.1 Propiedades físicas .....                                                                 | 64        |
| 3.2.1.1 Espesor .....                                                                           | 64        |
| 3.2.1.2 Solubilidad .....                                                                       | 67        |

## ÍNDICE (continuación)

|                                                                   | Página     |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.1.3 Permeabilidad al vapor de agua.....                       | 70         |
| 3.2.2 Propiedades superficiales .....                             | 73         |
| 3.2.2.1 Adherencia.....                                           | 73         |
| 3.2.3 Propiedades térmicas.....                                   | 76         |
| 3.2.3.1 Resistencia térmica.....                                  | 76         |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                                         | <b>80</b>  |
| <b>RECOMENDACIONES .....</b>                                      | <b>82</b>  |
| <b>FUENTES DE INFORMACIÓN .....</b>                               | <b>83</b>  |
| <b>ANEXOS.....</b>                                                | <b>100</b> |
| A. Nomenclatura .....                                             | 100        |
| B. Cálculos realizados del rendimiento de mucílago de nopal ..... | 101        |
| C. Medición del espesor .....                                     | 102        |
| D. Cálculos de la solubilidad .....                               | 104        |
| E. Cálculos de la permeabilidad al vapor de agua.....             | 105        |
| F. Cálculos de la resistencia térmica .....                       | 114        |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                         | Página |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Figura 1.</b> Nopalea auberi (Pfeiff.) Salm-Dyck.....                                                                                                | 25     |
| <b>Figura 2.</b> Estructura parcial propuesta para el mucílago de Opuntia ficus indica (Sáenz, 2004). ....                                              | 30     |
| <b>Figura 3.</b> Diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal (Abraján-Villaseñor, 2008). ....                                                | 33     |
| <b>Figura 4.</b> Desarrollo experimental del proyecto. ....                                                                                             | 49     |
| <b>Figura 5.</b> Proceso de obtención de películas comestibles a base de mucílago de nopal .....                                                        | 49     |
| <b>Figura 6.</b> Proceso de extracción del mucílago de nopal .....                                                                                      | 50     |
| <b>Figura 7.</b> Proceso de elaboración de películas comestibles a base de mucílago de nopal .....                                                      | 54     |
| <b>Figura 8.</b> Mucílago de nopal en polvo .....                                                                                                       | 60     |
| <b>Figura 9.</b> Películas comestibles a base de mucílago de nopal a) M1-0.8, b) M2-1.0, c) M3-1.5,<br>d) M4-0.5, e) M5-0.8, f) M6-1.0, g) M7-1.5 ..... | 62     |
| <b>Figura 10.</b> Medición del espesor de la película comestible M3-1.5 .....                                                                           | 66     |
| <b>Figura 11.</b> Prueba de solubilidad de las películas comestibles en agua .....                                                                      | 68     |
| <b>Gráfica 12.</b> Solubilidad de películas comestibles a base de mucílago de nopal con diferentes<br>concentraciones de HEC.....                       | 69     |
| <b>Figura 13.</b> Prueba de permeabilidad de vapor de agua en las películas comestibles.....                                                            | 71     |
| <b>Gráfica 14.</b> Permeabilidad al vapor de agua de películas comestibles a base de mucílago de nopal<br>con diferentes concentraciones de HEC.....    | 72     |
| <b>Figura 15.</b> Prueba de adherencia de las películas comestibles.....                                                                                | 74     |
| <b>Figura 16.</b> Adherencia de películas a base de mucílago de nopal en láminas de hojas de elote.....                                                 | 74     |
| <b>Figura 17.</b> Falta de adherencia de películas a base de mucílago de nopal en láminas de hojas de elote....                                         | 75     |
| <b>Figura 18.</b> Prueba de resistencia térmica de las películas comestibles.....                                                                       | 77     |
| <b>Gráfica 19.</b> Resistencia térmica de películas comestibles a base de mucílago de nopal con diferentes<br>concentraciones de HEC.....               | 78     |

## Índice de Cuadros

### Página

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Propiedades típicas de la hidroxietilcelulosa. (Kroschwitz, 1990) .....                    | 22 |
| <b>Cuadro 2.</b> Clasificación taxonómica de la especie de Nopalea en estudio. (GBIF, 2021) .....           | 26 |
| <b>Cuadro 3.</b> Rendimientos de extracción de mucílago de nopal fresco (Opuntia spp.) (Zavala, 2012) ..... | 33 |
| <b>Cuadro 4.</b> Composición química de la hoja de mazorca de maíz (Prado-Martínez et al., 2012). .....     | 48 |
| <b>Cuadro 5.</b> Formulación de las películas comestibles.....                                              | 52 |
| <b>Cuadro 6.</b> Características de las películas comestibles .....                                         | 63 |
| <b>Cuadro 7.</b> Espesor de las películas comestibles .....                                                 | 65 |
| <b>Cuadro 8.</b> Solubilidad de las películas comestibles .....                                             | 67 |
| <b>Cuadro 9.</b> Permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles .....                          | 70 |
| <b>Cuadro 10.</b> Resistencia térmica de las películas comestibles .....                                    | 76 |

## INTRODUCCIÓN

La tendencia por la protección del medio ambiente, ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas de empaques para frutas y verduras, disminuyendo el uso de empaques sintéticos no biodegradables. Actualmente se buscan emplear productos que se degraden totalmente en dióxido de carbono, agua y que posteriormente puedan servir como abono orgánico. Las películas elaboradas con materiales biodegradables como almidones, ceras, entre otras, ofrecen transparencia, flexibilidad y dureza, adicionalmente con el empleo de plastificantes comerciales, se logra aumentar sustancialmente la biodegradabilidad y mejoran las propiedades mecánicas y de barrera (Villada et al., 2007).

Una película comestible es una estructura formada por varias capas delgadas y continuas de materiales que pueden ser ingeridos por el ser humano, actúan principalmente como barrera a la transferencia de humedad, oxígeno, dióxido de carbono, aroma y lípidos, son un medio para transportar aditivos (antimicrobianos, antioxidantes, saborizantes, etc.) y ayudan a mejorar las características de manipulación e integridad estructural del alimento (Krochta & De Mulder-Johnston, 1997).

Los polisacáridos capaces de formar geles en agua son comunes en el reino de las plantas. Muchos de estos polisacáridos como las pectinas, carrageninas, alginatos y xantana han sido investigados de manera considerable en su aplicación para su uso en películas y/o recubrimientos comestibles. Recientemente, uno de los polisacáridos que se le ha dado importancia para su aplicación en películas y/o recubrimientos comestibles es el mucílago obtenido del nopal *Opuntia ficus indica* (Espino-Díaz et al., 2010; Del-Valle et al., 2005).

El mucílago de nopal es un polímero compuesto por polisacáridos semejante a las pectinas, esta propiedad, así como sus características reológicas le dan un potencial como materia prima para la elaboración de películas plásticas comestibles (Arizmendi-Cotero, 2004). Del Valle et al. (2005), comprobó la eficiencia de una película comestible de mucílago de nopal

como recubrimiento en fresas (*Fragaria ananassa*), observó el incremento de vida útil sin afectar el color y sabor del alimento.

La celulosa, y sobre todo sus formas esterificadas tales como la carboximetilcelulosa (CMC), metilcelulosa (MC), hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), hidroxipropilcelulosa (HPC) e hidroxietilcelulosa (HEC) son consideradas como buenos agentes formadores de películas, ya que son capaces de formar redes continuas en soluciones acuosas (Soliva & Martín, 2001; Turhan & Şahbaz, 2004). La HPC es el único polímero hidrófilo realmente termoplástico, por lo que puede ser extruído, colado o moldeado para formar películas (Guilbert & Biquet, 1995). Generalmente, las películas formadas a partir de estos ésteres son sólidas, claras y resistentes a los aceites y a la mayoría de solventes orgánicos no polares. Aunque las propiedades de barrera a la humedad, de las películas a partir de celulosa, no son muy buenas, éstas pueden mejorarse con la adición de sustancias hidrofóbicas (Pérez & Báez, 2003).

La adición de plastificantes a las soluciones filmogénicas empleadas para elaborar películas comestibles logra disminuir las fuerzas de atracción intermoleculares, modificando las propiedades mecánicas y de permeabilidad a gases (Gontard *et al.*, 1993).

México es el sexto mayor productor de maíz a nivel mundial con una producción de 24.5 millones de toneladas (Mendoza Escamilla, 2012). Está muy arraigado la cultura del maíz y se utiliza para preparar diversos platillos que incluyen tanto el grano como la hoja. Si se utiliza este material para fabricar envases se podría evitar deforestaciones innecesarias (Prado-Martínez *et al.*, 2012).

Por ello, se busca obtener una formulación adecuada de película comestible a base de mucílago de nopal que logre tener alta resistencia térmica y baja solubilidad para su posterior aplicación sobre láminas a base de hojas de elote que ayuden a la estructura y soporte de envases biodegradables.

## **OBJETIVOS**

### ***Objetivo General***

Desarrollar películas comestibles a base de mucílago de nopal con alta resistencia térmica.

### ***Objetivos Específicos***

- A) Obtener películas comestibles a base de mucílago de nopal combinada con otros biopolímeros.
- B) Evaluar propiedades físicas, superficiales y térmicas de las películas comestibles.

## JUSTIFICACIÓN

Los recubrimientos y películas comestibles, son una alternativa para mejorar y prolongar la calidad de los alimentos durante el manejo pre y postcosecha, así como el procesado, transporte y almacenamiento de los mismos (Espino-Díaz *et al.*, 2010); además, de ser una sustitución de plásticos.

En nuestro país, no se aprovechan los residuos del nopal de la forma más adecuada por lo cual se debe prestar atención a este problema, sin embargo, se puede utilizar el biopolímero conocido como mucílago de nopal para realizar películas comestibles como una forma de protección y adherirlos en vasos biodegradables que sean útiles para el ser humano.

Los vasos biodegradables están fabricados con polímeros naturales. Años de investigación científica han traído esta innovación que supone un cambio muy significativo en los procesos de producción y muy positivo para la reducción del impacto medio ambiental del ser humano (Eden , s.f.). La selección de vasos biodegradables es una alternativa a los vasos de plástico convencional (REYMA, 2019).

Este proyecto busca reutilizar los desechos de fuentes naturales como nopales que benefician tanto al medio ambiente como a la sociedad. Con la creación de películas comestibles, se busca proporcionar el soporte para las láminas a base de hojas de elote, mejorar su resistencia térmica, disminuir la solubilidad en agua y retardar la permeabilidad al vapor de agua.

En este trabajo se propone la elaboración de películas comestibles usando mucílago de nopal y otros biopolímeros con la finalidad de estudiar sus propiedades físicas, superficiales y térmicas, ya que se requiere un recubrimiento para el desarrollo de vasos biodegradables a base de hojas de elote.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Polímeros

#### 1.1.1 Generalidades

Los polímeros son materiales constituidos por la unión de monómeros, que son moléculas muy pequeñas, en largas y repetitivas cadenas. Los materiales tienen propiedades únicas, dependiendo del tipo de moléculas que se unen y cómo se unen (García Calopiña *et al.*, 2019).

Según García Calopiña *et al.* (2019), las características generales de un polímero son:

- 1) Bajo punto de fusión, que permite moldearlo fácilmente.
- 2) Baja densidad, son productos ligeros que son útiles para la industria del automóvil y la de los envases.
- 3) Pobre conductividad eléctrica y térmica, los vuelve ideales como materiales aislantes.
- 4) Poca reactividad química, no ocasionan riesgos al entrar en contacto con los alimentos, muy usados en el sector de los envases de un solo uso.

#### 1.1.2 Clasificación de los polímeros

Según Cedrón & Landa (2019), la clasificación de los polímeros según su origen, su estructura y su comportamiento térmico es la siguiente:

**Según su origen:**

- A) **Polímeros naturales:** Son polímeros que se existen en la naturaleza como tales, entre ellos tenemos el caucho, el almidón y la celulosa.

- B) **Polímeros sintéticos:** Son polímeros que pueden ser creados y sintetizados en laboratorios. Por ejemplo, el polímero más común que es el polietileno y las fibras de nylon.
- C) **Polímeros semisintéticos:** Son polímeros obtenidos realizando modificaciones de forma artificial a polímeros naturales en laboratorios. Por ejemplo, el acetato de celulosa y el caucho vulcanizado.

**Según su estructura:**

- A) **Polímeros lineales:** Son polímeros que tienen una estructura similar a una larga cadena lineal con uniones idénticas entre cada monómero, son de alto punto de fusión y densidad mayor. El ejemplo más común es el PVC (policloruro de vinilo).
- B) **Polímeros ramificados:** Son polímeros con una larga cadena lineal de uniones de monómeros, pero además poseen algunas cadenas ramificadas de diferente extensión, poseen una baja densidad y un bajo punto de fusión. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad (PEBD).

**Según su comportamiento térmico:**

- A) **Polímeros termoplásticos:** Son aquellos polímeros que pueden ser moldeados al calentarse y permite una fácil transformación de este, entre ellos tenemos el PVC.
- B) **Polímeros termoestables:** Son aquellos polímeros que al calentarse se descomponen químicamente y no pueden ser moldeados. Por ejemplo, tenemos la baquelita usada para fabricar asas de ollas.

## 1.2 Biopolímeros

### 1.2.1 Generalidades

Polímeros biodegradables o biopolímeros, definidos como todos aquellos que después de su vida útil sufren cambios por microorganismos, transformándolos a través de dos vías: anaeróbica y aeróbica, en energía, CO<sub>2</sub>, agua, metano, biomasa y componentes inorgánicos y pueden ser tanto de origen natural como sintetizados del petróleo (Mohanty *et al.*, 2005). Los biopolímeros de recursos renovables son producidos a partir de biomasa para la industria del envase. Biomasa proveniente de cosechas como la remolacha, azucarera, papas, trigo o maíz (Hernández Tomas , 2013).

De acuerdo a Hernández Tomas (2013), los biopolímeros pueden ser obtenidos por diferentes vías:

- 1) Remolacha azucarera> ácido glucónico> ácido poliglucónico.
- 2) Almidón> (fermentación)> ácido láctico> ácido poliláctico (PLA)
- 3) Almidón> (fermentación)> bioetanol> eteno> polietileno.

La diferencia entre polímero y biopolímero es que los biopolímeros tienen una estructura muy bien definida, la composición exacta, y la secuencia en donde estas unidades son organizadas es denominada estructura primaria, procedentes de fuentes naturales renovables. Asimismo, después de biodegradarse no producen sustancias tóxicas ya que pueden ser producidos por sistemas biológicos como los microorganismos, plantas y animales, o ser sintetizados químicamente con un precursor biológico tal como azúcares, almidón, grasas o aceites naturales (Emerging food R&D report, 2003). La mayoría de los biopolímeros son desdoblados para dar diferentes formas compactas que determinarán su función biológica, a diferencia de los polímeros sintéticos los cuales poseen estructuras al azar (Alfaro-Aranda, 2009).

Aunque la desventaja de los biopolímeros en cuanto a las películas formadas con estos, son sensibles a la humedad relativa del aire (efecto higroscópico) y tienen una resistencia mecánica limitada comparada con las películas sintéticas, sin embargo, la solución está en hacer mezclas de biopolímeros con polímeros sintéticos y se ha demostrado científicamente que los biopolímeros se biodegradan (Mendieta-Taboada *et al.*, 2008).

Los bioplásticos biodegradables son utilizados como envases desechables (ejemplo: platos, cubiertos, vasos, tazones, bolsas, etc.), que pueden convertirse en composta, junto con los alimentos o los residuos verdes, los cuales tienen un cierto uso en Europa, sin embargo, representan el 60% del mercado de materiales biodegradables. Japón también ha sido pionera en bioplásticos, incorporándolos a la electrónica y automóviles. El objetivo del bioplástico es similar al ciclo de la vida de la biomasa que incluye la conservación de recursos fósiles, agua y producción de CO<sub>2</sub> (Alfaro-Aranda, 2009).

### **1.2.2 Clasificación de biopolímeros.**

De acuerdo a la Unión Europea (UE) y Weber en 2000 se han clasificado estos materiales según su origen y método de producción:

- A) **Categoría 1. Polímeros directamente extraídos o removidos de biomasa.** Tal como son: los polisacáridos como el almidón (papa, maíz, trigo, arroz) y derivados (gomas, guar, pectina, quitina, celulosa, algodón, madera, etc.); las proteínas [caseína, suero de leche, colágeno/gelatina, zeína (proteína de maíz), soya y gluten]; y los lípidos (triglicéridos entrecruzados).
- B) **Categoría 2. Polímeros producidos por síntesis química clásica,** utilizando monómeros de fuentes renovables (por ejemplo, los monómeros de ácido láctico producto de la fermentación de carbohidratos, y otros poliésteres).

C) **Categoría 3. Polímeros producidos por microorganismos o bacterias genéticamente modificadas.** Actualmente el polímero más utilizado es el polihidroxialcanoato (PHA), mientras el desarrollo con bacterias celulósicas está en proceso.

Las características de los biopolímeros de la categoría 1, es que son hidrofóbicos por naturaleza, y algunos de éstos forman cristales causando problemas en el procesamiento y/o desempeño al fabricar los envases, pero todos forman excelentes barreras contra gases (Hernández Tomas , 2013).

En la categoría 2 según la clasificación Weber en 2000, el ácido poliláctico abarca toda esta categoría, siendo un polímero potencial para comercializarse a gran escala para la producción de envases biodegradables. De la misma manera, en la categoría 3 se hace mayor énfasis en el estudio de los polihidroxialcanoatos (PHA's) (Hernández Tomas , 2013).

La innovación en el desarrollo de materiales de biopolímeros, la preservación de materiales a base de petróleo, la completa degradación biológica, la reducción en el volumen de residuos y compostabilidad, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, además del incremento en el uso de recursos agrícolas para la producción de nuevos materiales “verdes”, son razones de gran interés actual. Los polímeros biodegradables ofrecen una posible solución a los problemas de disposición final de residuos que enfrentan los plásticos derivados del petróleo (Mohanty *et al.*, 2005).

### **1.2.3 Celulosa**

#### **1.2.3.1 Generalidades**

La celulosa es la sustancia orgánica más abundante en la naturaleza (Bovey & Winslow, 1981). Por lo tanto, no sorprende que la humanidad haya hecho uso de la celulosa desde tiempos inmemoriales con distintos fines tales como obtener papel, en la construcción y, últimamente,

como una fuente de bioenergía. Estas aplicaciones conciernen a la celulosa tanto en su estado natural como modificada física o químicamente (Solis, 2016).

La celulosa es el principal componente de las paredes celulares de plantas y algas verdes. Este biopolímero se presenta en la madera en un 40 – 50%, 80% en fibras de lino y 90% en las fibras de algodón (Marchessault & Sundararajan, 1983). La purificación comercial de la celulosa se realiza a partir de las fibras de algodón y de la pulpa de madera, en el primer caso por el alto contenido en este polisacárido y en el segundo, por la accesibilidad de este recurso. En su estado natural, la celulosa es difícil de purificar ya que es insoluble en los solventes comerciales. Así, el aislamiento de la celulosa en su forma pura incluye tratamiento alcalino para la remoción de ceras, proteínas y ligninas. Las pulpas destinadas a la obtención de éteres de celulosa sufren pasos de extracción alcalina adicionales para remover polisacáridos de bajo peso molecular llamados hemicelulosas y aumentar la fracción de la celulosa pura (Coffey *et al.*, 1995).

Si bien existen numerosos derivados obtenidos por modificaciones químicas de la celulosa natural, sólo unos pocos éteres de celulosa han encontrado aplicación en la industria alimentaria. Los derivados más comúnmente usados son la carboximetilcelulosa, metilcelulosa, e hidroxipropilmetilcelulosa. Estos dos últimos son empleados debido a la capacidad de formar geles termorreversibles y por sus propiedades interfaciales (Kobayashi *et al.*, 1999; Sarkar & Walker, 1995). Aunque la variedad de éteres de celulosa es amplia, todos ellos son obtenidos esencialmente de igual forma (Kondo, 1993). El proceso de producción puede ser dividido en tres etapas: obtención del álcali de celulosa, alquilación o hidroxialquilación y purificación final del producto. El peso molecular de estos polímeros se manifiesta en la viscosidad de sus soluciones. Así, a medida que el peso molecular disminuye, la viscosidad disminuye. Para estos derivados de celulosa, por lo tanto, el peso molecular es una información importante (Coffey *et al.*, 1995).

La celulosa, y sobre todo sus formas esterificadas tales como la carboximetilcelulosa (CMC), metilcelulosa (MC), hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), hidroxipropilcelulosa (HPC) e hidroxietilcelulosa (HEC) son consideradas como buenos agentes formadores de películas, ya que son capaces de formar redes continuas en soluciones acuosas (Soliva & Martín, 2001; Turhan & Şahbaz, 2004). La HPC es el único polímero hidrófilo realmente termoplástico, por lo que puede ser extruido, colado o moldeado para formar películas (Guilbert & Biquet, 1995). Generalmente, las películas formadas a partir de estos ésteres son sólidas, claras y resistentes a los aceites y a la mayoría de solventes orgánicos no polares. Este tipo de cubiertas se emplea para controlar la difusión de oxígeno y dióxido de carbono, con el fin de retrasar los procesos de maduración de frutos y vegetales. Aunque las propiedades de barrera a la humedad, de las películas a partir de celulosa, no son muy buenas, éstas pueden mejorarse con la adición de sustancias hidrofóbicas (Pérez & Báez, 2003).

#### **1.2.4 Hidroxietilcelulosa**

##### **1.2.4.1 Generalidades**

La hidroxietilcelulosa (HEC) es un éter de celulosa elaborado normalmente haciendo reaccionar celulosa alcalina con óxido de etileno (OE). En general, la relación molar del OE respecto a las unidades de glucosa anhidra de la celulosa, es superior a 1.5, para proporcionar una adecuada solubilidad en agua de la cadena principal de la celulosa. La HEC es un polímero soluble en agua/capaz de hincharse en agua, que generalmente se usa para dar viscosidad a medios acuosos de sistemas funcionales, tales como productos para el hogar y el cuidado personal, pinturas, productos para materiales de construcción, recubrimientos para el papel, medios para los campos petrolíferos, emulsiones, componentes del látex, etc. Además, se usan HEC de alto peso molecular en la industria farmacéutica como excipiente para proporcionar una barrera de difusión que se puede hinchar, en las aplicaciones de liberación controlada (España Patente nº 2 309 960 T5, 2017).

La hidroxietilcelulosa es un polímero no iónico, típicamente preparado por la reacción de la celulosa con óxido de etileno. Sus propiedades típicas se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** *Propiedades típicas de la hidroxietilcelulosa (Kroschwitz, 1990).*

| PROPIEDAD                                             | VALOR   |
|-------------------------------------------------------|---------|
| <i>Polímero</i>                                       |         |
| Cenizas, como Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %     | 3.5     |
| Humedad máxima (%)                                    | 5.0     |
| Efecto del calentamiento, rango de ablandamiento (°C) | 135-140 |
| Peso (kg/L)                                           | 1.39    |
| <i>Soluciones (2%)</i>                                |         |
| sp g (g/mL)                                           | 1.0033  |
| Índice de refracción                                  | 1.336   |
| pH                                                    | 7       |
| <i>Películas</i>                                      |         |
| Índice de refracción                                  | 1.51    |
| sp g a 50% HR, (g/mL)                                 | 1.34    |
| Contenido de humedad (equilibrio) a 23°C, 50% HR, (%) | 6       |

La diferencia con la celulosa es que algunos o todos los grupos hidroxilo (-OH) de las unidades de glucosa se han sustituido por grupos hidroxietil éter (-OCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH). Estos grupos, más voluminosos, impiden la cristalización del polímero, el empaquetamiento de las cadenas. En consecuencia, la hidroxietilcelulosa es soluble en agua. Además de ser un buen laxante, se utiliza para espesar champús, también hace que el jabón del champú sea menos espumoso y contribuye a la acción limpiadora del champú, formando coloides alrededor de las partículas de suciedad (Rubio, 2009).

También es muy empleada como un estabilizador y espesante en las formulaciones de pintura como es bien establecido y la HEC es agregada como un aditivo durante la fabricación de pinturas, para lograr los efectos reológicos deseados, por ejemplo, un comportamiento tixotrópico durante la aplicación del revestimiento (Schwartz *et al.*, 2001; Warson *et al.*, 2001). Los mecanismos espesantes principales de la HEC en recubrimientos están primeramente por

entre sus 67 propiedades de solución, por ejemplo, la reología de un polímero en solución y en segundo lugar a través de sus propiedades de adsorción, por ejemplo, la sucesión y los lazos en las partículas del polímero y las partículas de los pigmentos, así como el enlace limitado entre varias partículas coloidales en la formulación (Craig, 1986; Schwartz *et al.*, 2001; Warson *et al.*, 2001). Ambos comportamientos el de solución y el de adsorción de la HEC, son determinados en gran magnitud por el peso molecular de la columna celulósica, junto con las interacciones de las moléculas de la HEC con los surfactantes en la formulación. Una desventaja de los surfactantes convencionales usados en la producción del látex y la formulación de la pintura, son que causan dificultades en el uso final del revestimiento, por ejemplo, el hacer espuma durante el manejo, el uso y la susceptibilidad del agua en el revestimiento de las películas son problemas comúnmente encontrados (Hellgren *et al.*, 1999).

#### **1.2.4.2 Datos físicoquímicos**

Polvo o gránulos blancos, blanco-amarillento, o blanco-grisáceo. Soluble en agua caliente y en agua fría, dando una disolución coloidal, prácticamente insoluble en acetona, en etanol al 96% y en tolueno (acofarma, s. f.)

#### **1.2.4.3 Propiedades y usos**

De acuerdo con acofarma (s. f.), las propiedades y usos, se describen a continuación:

- A) Forma geles muy transparentes y con una buena consistencia semisólida.
- B) Dichos geles presentan una ligera adhesividad, por lo que se puede añadir silicona para aumentarla. También se puede incorporar un humectante para evitar su desecación.
- C) El pH de estabilidad es de 2 – 11, siendo muy resistentes a principios activos ácidos, como el ácido glicólico.

- D) También presentan una elevada resistencia a la mayoría de los electrolitos (salvo si están a saturación).
- E) Se utiliza también como agente para aumentar la viscosidad y además, como recubrimiento de pastillas y agente endurecedor y suspensor.
- F) Está presente en preparaciones lubricantes para ojos resacos, para el cuidado de lentes de contacto, y para la sequedad bucal.

#### **1.2.4.4 Consistencia**

Según Cosmética Dr. Alía (2017), la dosificación dependerá de la concentración empleada de la hidroxietilcelulosa:

- A) Geles fluidos al 0.8-1.5 %.
- B) Geles de consistencia media al 2-2.5%
- C) Geles con alta consistencia al 3-5 %.

#### **1.2.4.5 Incompatibilidades**

Según acofarma (s. f.), las siguientes incompatibilidades son: Incompatible en medios alcalinos, con alcohol etílico (en más del 30 %), y con electrolitos a saturación; es parcialmente compatible con caseína, almidón, metilcelulosa, alcohol polivinílico y gelatina. Es incompatible con zeína (proteína del maíz).

### **1.2.5 Nopal**

#### **1.2.5.1 Generalidades**

Las cactáceas son originarias del continente americano, siendo México un país considerado centro de biodiversidad por excelencia (Paredes López *et al.*, 2006).

En México, encontramos el mayor número de géneros y especies de toda América, vale la pena mencionar que de las 1600 especies que forman esta familia, en México habitan 1088 (Ríos & Quintana, 2004).



**Figura 1.** *Nopalea auberi* (Pfeiff.) Salm-Dyck.

Los nopales son originarios de América tropical y subtropical y hoy en día, se encuentran en una gran variedad de condiciones agroclimáticas, en forma silvestre o cultivada, en todo el continente americano. Además, a partir de que los conquistadores las llevaron a Europa en el siglo XVI y su cultivo y naturalización se dio principalmente en España e Italia, se han difundido a gran parte de Europa, África, Asia y Oceanía donde también se cultivan o se encuentran en forma silvestre. En México, los nopales se encuentran desde el norte hasta el centro del país y alcanzan su mayor complejidad y riqueza en el Altiplano central (Paredes López *et al.*, 2006; Sáenz *et al.*, 2006).

Los nopales pertenecen a la familia Cactaceae comúnmente conocidas como cactáceas o cactus. El nopal es endémico de América y existen aproximadamente 258 especies reconocidas, de las cuales aproximadamente 100 se encuentran en México, país que cuenta con

plantaciones especializadas para consumo humano (Ríos & Quintana, 2004; Paredes López *et al.*, 2006).

### 1.2.5.2 Clasificación botánica

En México se les llama nopal a varias especies del género “*Opuntia*” de la familia “*Cactaceae*”. En el libro *Cactáceas de México* de Helia Bravo (1978) para los nopales se presentan 2 géneros: *Opuntia* y *Nopalea*. En México, el género *Opuntia* presenta 5 subgéneros, 17 series y 104 especies. El género *Nopalea* presenta 10 especies, de las cuales la “*Nopalea cochenillifera*” se utiliza como Nopal verdura. En resumen: de las 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea*, se utilizan para forraje 15 especies, 5 para fruta y 3 para verdura; 2 de *Opuntia* y una de *Nopalea* (Ríos y Quintana, 2004; Paredes-López *et al.*, 2006).

La clasificación taxonómica del nopal (Figura 1) se muestra en el Cuadro 2. Así como también la especie que se desarrollará en el presente proyecto de investigación. Los nombres comunes del nopal mencionado, según GBIF (2021) son: lengua de vaca, nopal alargado, nopal de lengua, nopal de lengüita, tuna de playa.

**Cuadro 2.** Clasificación taxonómica de la especie de *Nopalea* en estudio (GBIF, 2021).

|                   |                                           |
|-------------------|-------------------------------------------|
| Reino             | Plantae                                   |
| Filo              | Tracheophyta                              |
| Clase             | Magnoliopsida                             |
| Orden             | Caryophyllales                            |
| Familia           | Cactaceae                                 |
| Género            | <i>Nopalea</i>                            |
| Especie           | <i>Nopalea auberi</i>                     |
| Nombre científico | <i>Nopalea auberi</i> (Pfeiff.) Salm-Dyck |
| Basónimo          | <i>Opuntia auberi</i> Pfeiff.             |

### **1.2.5.3 Descripción morfológica**

La succulencia es la principal característica morfológica de los nopales y de la mayoría de las cactáceas. El nopal, al igual que casi todas las cactáceas, es una planta que no tiene hojas. Son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar 3.5 a 5 m de altura (Sudzuki, 1999).

El sistema radicular es una parte extensa, densamente ramificada, rica en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Sudzuki, 1999).

Los tallos o cladodios, comúnmente llamados pencas, presentan forma de raqueta ovoide o alargada alcanzando hasta 60-70 cm de longitud y 25 cm de ancho dependiendo del agua y los nutrientes disponibles. Estos se encuentran protegidos por una cutícula gruesa que en algunas ocasiones está cubierta de cera o pelos que ayudan a disminuir la pérdida de agua. Los cladodios presentan además espinas, presentando pocas estomas por unidad de superficie con la particularidad de permanecer cerrados durante el día, evitando así la pérdida de agua por transpiración, y abiertos en la noche favoreciendo la entrada de anhídrido carbónico, indispensable para la fotosíntesis (Sudzuki, 1999; Paredes López *et al.*, 2006). La parte interior de las pencas está formada por la clorénquima donde se lleva a cabo la fotosíntesis y el parénquima con la principal función de almacenar agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía (Sáenz, 2004).

Las aréolas se encuentran en ambas caras del cladodio, se presentan en forma de yemas que tienen la capacidad de desarrollar nuevos cladodios, flores y raíces aéreas, según las condiciones ambientales. Presentan en su cavidad espinas, que generalmente son de dos tipos: algunas pequeñas, agrupadas en gran número (gloquidios o comúnmente llamados aguates) y las grandes que algunos autores llaman hojas modificadas (Granados & Castañeda, 2000).

El fruto es una falsa baya con ovario ínfero simple y carnoso. La forma y tamaño de los frutos, conocidos como tunas, es variable, los hay ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos (Sáenz, 2006).

Finalmente, las flores son sésiles, hermafroditas y solitarias, se desarrollan normalmente en el borde superior de las pencas. Su color es variable: hay rojas, amarillas, blancas, entre otros colores (Sudzuki, 1999).

### **1.2.6 Mucílago de nopal**

#### **1.2.6.1 Generalidades**

La epidermis del nopal tiene dos capas, una de células verdes llamada clorénquima y otra capa interna, formada por un cilindro de células blancas, conocida como parénquima. Su función principal es el almacenamiento de agua (Granados & Castañeda, 2000). Dentro de los tejidos de la clorénquima y del parénquima, existen células mucilaginosas que almacenan el mucílago, estas células parecer ser más abundantes en el parénquima (Nobel, 2002). Trachtenberg y Meyer (1982) han demostrado que el mucílago solo está presente en el aparato de golgi y que su síntesis probablemente se lleva a cabo en él.

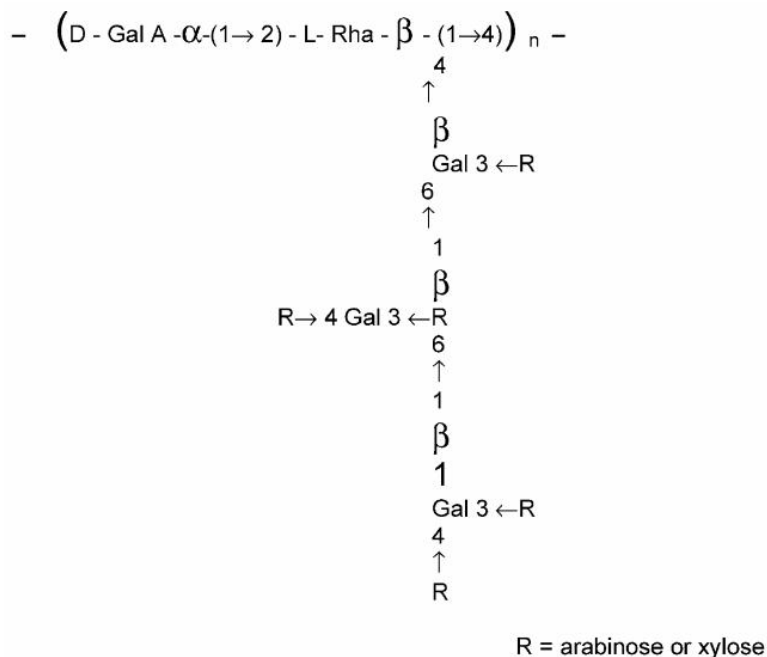
El nopal tiene la capacidad de resistir temporadas prolongadas de sequía debido a la presencia de mucílagos que al formar redes moleculares tridimensionales son capaces de retener grandes cantidades de agua (Cárdenas *et al.*, 1997). El mucílago está presente como su sal de calcio en las células de mucílago del parénquima de la penca (Trachtenberg & Mayer, 1982). El mucílago (hidrocoloide), es una sustancia viscosa, conformada de células que contienen mono o disacáridos, los cuales interactúan y forman polisacáridos (Chandra *et al.*, 1998).

El mucílago es un hidrocoloide el cual forma enlaces moleculares que son capaces de retener una gran cantidad de agua. Este hidrocoloide puede ser extraído de la penca (y también

de la cáscara del fruto) del nopal, aunque con rendimientos muy variables y a veces muy bajos desde 0.07% (Cárdenas *et al.*, 1997) hasta del 1.56% (Sepúlveda *et al.*, 2007). Cuando está hidratado, este polisacárido es altamente susceptible al ataque microbiano debido a su composición y alta actividad de agua ( $>0.8$ ), por lo que su vida útil es de 2 a 3 días a 25 °C, por ello, para su conservación es conveniente deshidratarlo (Sepúlveda *et al.*, 2007; León-Martínez *et al.*, 2010).

El mucílago de nopal es un polisacárido complejo con un alto peso molecular ( $2.3 \times 10^4$ - $13.3 \times 10^6$  g/mol), conformado principalmente por los siguientes monómeros en diversas proporciones; L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y xilosa, así como de ácido galacturónico. La proporción de estos monómeros en la molécula depende de varios factores como son la variedad, edad y las condiciones ambientales. En el caso del mucílago obtenido de *Opuntia ficus indica* se ha reportado su composición con aproximadamente 24.6–42% de arabinosa, 21–40.1% de galactosa, 8–12.7% de ácido galacturónico, 7–13.1% de ramnosa y 22–22.2% de xilosa, además de otros minerales presentes como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^{+}$  (Abraján-Villaseñor, 2008; Sepúlveda *et al.*, 2007; Sáenz *et al.*, 2004).

Las unidades de azúcares del mucílago forman un polisacárido ramificado de ácido galacturónico y ramnosa como unidades centrales. Las cadenas laterales tienen a su vez un esqueleto formado de  $\beta$ -galactosa, el cual se encuentra unido a ramnosa en el eje central, y ramificaciones laterales con unidades de arabinosa, xilosa y galactosa (Medina-Torres, 2005; Sáenz *et al.*, 2004). Su estructura parcial se presenta en la Figura 2.



**Figura 2.** Estructura parcial propuesta para el mucílago de *Opuntia ficus indica* (Sáenz, 2004).

#### 1.2.6.2 Propiedades del mucílago de nopal

Los mucílagos en contacto con el agua forman unas dispersiones viscosas y poseen una enorme facilidad de embeberla; propiedad de suma importancia en el mecanismo de retención del agua de las cactáceas. Los mucílagos están contenidos dentro de las grandes células vesiculares de los parénquimas (Orozco E. , 2017).

En México, el mucílago se ha usado con cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) puesto que, de acuerdo con Cárdenas et al., (1998) aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua, siendo esta mezcla aplicada en monumentos y edificios históricos (Orozco E. , 2017)

#### 1.2.6.3 Usos del mucílago

Estos hidrocoloides pueden ser agentes espesantes de amplio uso en la industria de alimentos y farmacéutica. Su viscosidad ha sido estudiada por diferentes autores (Cárdenas et al., 1997; Medina-Torres et al., 2000; Goycoolea et al., 2000; Medina-Torres et al., 2003) con resultados interesantes, por lo que podría competir con gomas que ya están en los mercados

como son goma de garrofín y goma de guar. Rwashda, citado por Garti (1999), ha estudiado la capacidad emulsionante de la goma o mucílago de *Opuntia ficus-indica* y encontró las siguientes funciones:

- 1) Reduce la tensión superficial e interfacial;
- 2) Estabiliza emulsiones del tipo aceite-agua;
- 3) Forma gotas de aceite pequeñas;
- 4) Absorbe hacia la interfase aceite-agua y no contribuye a la viscosidad de los sistemas; y los sistemas no floculan.

Espinosa (2002) estudió la adición de dispersiones de mucílago de nopal, en distintas concentraciones (0.5 y 0.8%), encontrando que la estabilidad en espumas elaboradas con clara de huevo aumenta con la adición de mucílago. Este tipo de ingredientes mejoran la textura y estabilizan las emulsiones, controlan la cristalización, estabilizan suspensiones, inhiben la sinéresis y crean películas comestibles. Algunos de ellos tienen la capacidad de formar geles.

Anteriormente se creía que las gomas o hidrocoloides no contribuyen para mejorar el valor nutritivo de los alimentos. Por lo tanto, no se incrementaban calorías, ni aportaban sabor y aroma a los productos a los que se adicionaban. Hoy se considera que la fibra insoluble de los alimentos no contribuye con calorías, pero la fibra soluble contribuye al valor calórico de los alimentos en forma variable. En fin, la adición de fibra insoluble a los alimentos es un modo de reducir el aporte energético de los alimentos (Nelson, 2001).

La alta concentración de mucílago encontrado en algunas especies de nopal, la conformación polimérica y las propiedades reológicas de este compuesto, sugieren un potencial considerable de estas cactáceas como materia prima en la elaboración de diversos productos o en la obtención de aditivos mejoradores de la textura de los alimentos, ya que puede modificarle

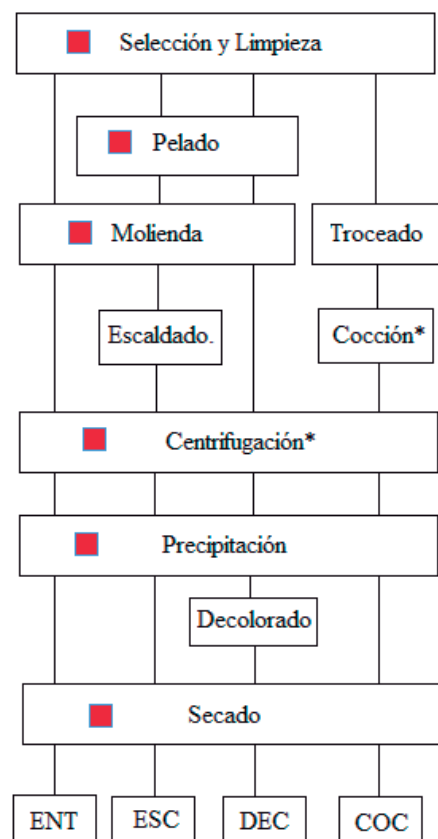
en el alimento sus propiedades funcionales como son la viscosidad, la elasticidad, la retención de agua, el poder gelificante y el poder espesante. También en la industria alimentaria llama la atención como materia prima en la elaboración de películas plásticas comestibles (Ruiz & Guerrero, 2009).

Este polisacárido puede ser utilizado en forma de polvo seco en la formulación de diversos productos. Para ello, el mucílago debe ser extraído por precipitación del jugo de nopal usando un solvente, el precipitado así obtenido es luego filtrado para la eliminación del solvente, posteriormente es secado al vacío y finalmente se muele para estandarizar el tamaño de partícula (Orozco *et al.*, 2006).

Del-Valle *et al.* (2005) desarrollaron un recubrimiento comestible hecho a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y reportaron que su aplicación ayudó a extender la vida de anaquel en fresas (*Fragaria ananassa*). Arizmendi-Cotero (2004) realizó un trabajo de investigación sobre la optimización del uso de dos plastificantes en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir de mucílago de la especie *Opuntia tomentosa* y la caracterización de su comportamiento mecánico. Como resultado obtuvo que el glicerol es el compuesto que confiere mejores características a dichas películas (Ruiz & Guerrero, 2009).

#### **1.2.6.4 Extracción del mucílago y rendimientos**

El método de extracción del mucílago del nopal de forma general es similar comparando a los diferentes autores consultados (Cárdenas *et al.*, 1997; Majdoub *et al.*, 2001; Sepúlveda *et al.*, 2007; Abraján-Villaseñor, 2008; Rodríguez, 2010) únicamente varían las condiciones de cada una de las etapas del proceso. A continuación, (Figura 3) se muestra el diagrama de flujo propuesto por Abraján-Villaseñor (2008), donde los cuadros rojos indican el método general, a partir del cual se hacen modificaciones obteniendo así diferentes variantes del proceso de extracción de mucílago (Zavala, 2012).



**Figura 3.** Diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal (Abraján-Villaseñor, 2008).

Nota: (ENT=Entero, ESC=Escaldado, DEC=Decolorado, COC=Cocido)

\*Después de estas etapas, se elimina el residuo sólido y se continúa con el líquido.

**Cuadro 3.** Rendimientos de extracción de mucílago de nopal fresco (*Opuntia spp.*) (Zavala, 2012).

| Rendimiento (g/100g)            | Fuente.                        |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1.0-1.2                         | Sáenz & Sepulveda, 1993        |
| 0.07                            | Cárdenas <i>et al.</i> , 1997  |
| 0.085 g de mucílago purificado. | Majdoub <i>et al.</i> , 2001   |
| 1.5                             | Sepúlveda <i>et al.</i> , 2007 |
| 0.66                            | Abraján-Villaseñor, 2008       |
| 0.85                            | Abraján-Villaseñor, 2008       |
| 0.33                            | Abraján-Villaseñor, 2008       |
| 0.5 g -0.6 g                    | Rodríguez, 2010                |

En el Cuadro 3, se muestran los resultados obtenidos por diferentes autores que han reportado los rendimientos de mucílago de nopal según su proceso de extracción (Zavala, 2012).

Es importante mencionar que los rendimientos varían según el grado de madurez de los cladodios de nopal, condiciones climáticas y tiempo de recolección (Sepúlveda et al., 2006).

### **1.3 Películas comestibles**

#### **1.3.1 Generalidades**

Con el fin de solucionar los problemas generados por los residuos plásticos, se han realizado esfuerzos en la investigación para obtener materiales amigables con el medio ambiente. En consecuencia, los polímeros naturales o biopolímeros han recibido mucha atención debido a estas preocupaciones ambientales. Dentro de estos materiales, se encuentran los recubrimientos y las películas comestibles. Ambos pueden ser definidos como una o más capas delgadas y continuas compuestas por materiales que pueden ser ingeridos por el consumidor. Sin embargo, se diferencian ya que los recubrimientos comestibles se aplican directamente sobre el producto ya sea por inmersión, rociado o pincelado y se forman sobre el mismo mientras que las películas comestibles, se producen separadamente y posteriormente se usan sobre el producto alimenticio (Guo *et al.*, 2014). Tanto los recubrimientos como las películas comestibles pueden prevenir el deterioro de la calidad e incrementar la vida útil de los productos alimenticios ya que actúan como barreras que pueden controlar la transferencia de humedad, oxígeno, lípidos y sabores (Khazaeia *et al.*, 2014). Asimismo, pueden utilizarse como soporte de aditivos y nutrientes; y desempeñar un papel importante en la conservación, distribución y comercialización de alimentos. Su uso en aplicaciones alimentarias y especialmente en productos altamente perecederos tales como los frutihortícolas, está basado en algunos atributos funcionales particulares que poseen, su costo y disponibilidad (Falguera *et al.*, 2011).

Las películas comestibles deben, en general, ser neutras, es decir, no afectar el sabor, color y aroma de los alimentos a los que se aplican a menos que se persigan objetivos específicos de modificación de estos atributos (Alzate, 2017)

Una película es una capa delgada de material comestible, formada por separado y que es colocada sobre una superficie nivelada para su posterior uso (Sharma & Rao, 2015).

Las películas están formadas por tres componentes: el polímero, el disolvente y finalmente el plastificante (Solano-Doblado *et al.*, 2018).

Las técnicas comúnmente utilizadas para la elaboración de las películas comestibles son las siguientes:

- 1) Por Eliminación del Disolvente.** - En este proceso se forma y se estabiliza una estructura molecular por interacciones físicas y químicas. La disolución formadora del hidrocoloide comestible se incorpora en un disolvente (agua, etanol, ácido acético) que contiene a los aditivos como, plastificantes, agentes de reticulación o solutos; paso seguido se elimina el disolvente, con lo que se forma una capa delgada que se seca y que finalmente se puede desprender (Cagri *et al.*, 2004).
- 2) Por Gelación Térmica.** - La aplicación de un tratamiento térmico en este proceso permite la formación de un gel estable de estructura rígida. Ésta es utilizada generalmente para películas y recubrimientos elaborados a base de proteínas, descrita como un proceso en el que la desnaturalización térmica desestabiliza las moléculas de proteínas, las cuales dan lugar a la formación de un entramado estable entre partículas (Carmona Gallego *et al.*, 2007).
- 3) Por Solidificación.** - En este método las macromoléculas junto con el plastificante, son disueltas hasta su homogeneización y son vertidas en capas finas sobre moldes (Ávila-Sosa *et al.*, 2012).

- 4) **Por el método de “Casting”.** - Una vez realizada la disolución de los componentes de la película, se realiza la evaporación del disolvente a temperatura y humedad controladas, provocando la formación de la película (Escobar *et al.*, 2009).
- 5) **Por “electrospraying”** (Pulverización electrohidrodinámica). -Es un método de atomización del líquido formador de la película por medio de fuerzas eléctricas, en donde el líquido sale por una boquilla con un alto potencial eléctrico. La ventaja de este método es que las gotas que se obtienen son tan pequeñas que el tamaño de su partícula llega a medir incluso nanómetros, y la carga y el tamaño pueden controlarse en cierta medida por medios eléctricos (Jaworek & Sobczyk, 2008).
- 6) **Por Microfluidización.** - Proceso en que las dispersiones se hacen pasar a través de microcanales, lo que permite la obtención de nanopartículas que otorgan a la película mejores características físicas, y posteriormente se aplica el método de casting para la formación de la película (Monroy-Villagrana *et al.*, 2014).

### 1.3.2 Películas a base de biopolímeros

Existen diferentes biopolímeros con los cuales ofrecen características adecuadas para la elaboración de películas biodegradables. Si bien una película no puede sustituir completamente los materiales de empacamiento tradicionales, ofrecen muchos beneficios, tanto en su uso individual como en mezclas con plásticos o materiales comúnmente usados en envases y embalajes de la industria alimentaria (Orozco E. , 2017).

Según Orozco E. (2017), Las películas pueden:

- 1) Soportar aditivos alimentarios: pueden ser usados para incorporar agentes antimicrobianos, antioxidantes y otros, en localizaciones específicas del alimento.

- 2) Retardar la migración de humedad: la velocidad de transferencia de humedad entre un alimento y la atmosfera que lo rodea puede ser reducida si el producto entero es recubierto por una película.
- 3) Retardar la migración de aceites y grasas: películas basadas en polímeros hidrofóbicos, son altamente impermeables a grasas y aceites, atributos deseables cuando el alimento está destinado a ser freído en aceite. Algunas películas tienen la capacidad de retardar la absorción de aceite hacia el interior del alimento y, por lo tanto, mejoraría su calidad nutricional.
- 4) Retener compuestos volátiles del flavor: películas basadas en hidrocoloides pueden desarrollar este efecto.
- 5) Retardar el transporte de gases ( $O_2$ ,  $CO_2$ ): Como modo primario de deterioro de muchos alimentos involucra la oxidación de lípidos, vitaminas, componentes del flavor o pigmentos. Las películas también disminuyen la velocidad de la respiración aeróbica de frutas frescas y vegetales.
- 6) Retardar el transporte de solutos: las coberturas comestibles pueden mantener una alta concentración de distintos compuestos sobre la superficie de un alimento colaborando a su concentración en la interface de interés. Esto puede utilizarse para minimizar la difusión de solutos hacia el interior del alimento, en la deshidratación osmótica.
- 7) Mejorar las propiedades mecánicas frente al manipuleo e impartir integridad estructural adicional a los alimentos: el refuerzo de la estructura por una película comestible podría mejorar la integridad durante el procesamiento, almacenamiento y/o distribución.

### **1.3.3 Plastificantes**

Los plastificantes más comúnmente usados en películas comestibles son los polioles como por ejemplo glicerol, sorbitol, derivados del glicerol y polietilenglicoles o lípidos y sus derivados, por ejemplo: fosfolípidos, ácidos grasos y surfactantes. Son generalmente requeridos, en aproximadamente 10 al 60% en relación a los sólidos presentes, dependiendo de la rigidez del polímero. El principal inconveniente de los plastificantes es que disminuyen la cohesión de la película, provocando el incremento en la permeabilidad a los gases, al vapor de agua y solutos (Alzate, 2017).

Los plastificantes pueden ser definidos como compuestos no-volátiles de muy bajo peso molecular adicionados a distintos polímeros para reducir la fragilidad, impartir flexibilidad y mejorar la resistencia de las películas. En el caso específico de películas, los plastificantes reducen el agrietamiento y mejoran la flexibilidad de la misma. En términos generales, estos componentes reducen las fuerzas intermoleculares a lo largo de las cadenas del polímero, lo que aumenta el volumen libre y los movimientos de la cadena (Rungsinee Sothornvit, 2005).

#### **1.3.1.1 Glicerol**

El glicerol es el plastificante más ampliamente usado para mejorar las propiedades mecánicas y la transparencia de las películas comestibles. Los grupos hidroxilo presentes en el glicerol son responsables de las interacciones inter e intramoleculares (puentes de hidrógeno) en las cadenas poliméricas, proporcionando a las películas una estructura más flexible (Prakash Marana *et al.*, 2013).

#### **1.3.1.2 Polietilenglicol-4000**

Polímero termoplástico obtenido mediante la polimerización del óxido de etileno; los distintos tipos de polietilenglicol se diferencian según su peso molecular medio del cual toman el nombre (CTS ESPAÑA, s.f.).

El PEG es soluble en agua y en muchos disolventes orgánicos; sin embargo, al aumentar el peso molecular (3600 – 4400 g/mol) disminuye tanto la solubilidad como la higroscopía (CTS ESPAÑA, s.f.).

#### **1.3.4 Propiedades físicas de las películas comestibles**

Las propiedades físicas más importantes para las películas comestibles son: color, opacidad aparente, transparencia, solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y a los gases (oxígeno, monóxido de carbono, etileno), y aquellas relacionadas con la resistencia mecánica (Roblejo, 2009). En este caso, se realizará la medición del espesor, la solubilidad y la permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles a base de mucílago de nopal con alta resistencia térmica.

##### **1.3.4.1 Espesor**

Esta propiedad es rigurosamente controlada durante la elaboración de las películas, porque este parámetro influye sobre las propiedades mecánicas y de barrera (Liling *et al.*, 2016).

Las películas y recubrimientos comestibles en su totalidad son de naturaleza hidrofílica. Existe una relación muy fuerte entre la permeabilidad al vapor del agua y el espesor de los films. A medida que el espesor se agranda, la resistencia a la transmisión de masa de la película o recubrimiento se incrementa (Hernández Cabrera, 2016).

##### **1.3.4.2 Solubilidad**

La solubilidad en agua es una propiedad física importante para determinar si la película se descompone con facilidad, a mayor solubilidad el film resiste menos al agua, es decir que son más susceptibles a degradación (Alvarado-González *et al.*, 2011).

Una característica deseable en las películas comestibles es la resistencia al agua, dado que ella contribuye a mantener la integridad de las mismas, en caso que vayan a ser usadas para la conservación de alimentos de humedad intermedia a alta (Ozdemir & Floros, 2008).

#### **1.3.4.3 Permeabilidad**

Es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable (Carballo & Martínez , 2010).

Según Carballo & Martínez (2010), la velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de cuatro factores básicos:

- A) La estructura del material: porosidad efectiva (huecos interconectados), tamaño de los poros, sección y espesor de la película.
- B) La densidad del fluido considerado, que puede ser afectada por la temperatura.
- C) La presión a que está sometido el fluido.
- D) Tiempo de exposición.

##### **1.3.4.3.1 Permeabilidad al vapor de agua**

De acuerdo con la norma ASTM E96-00, la permeabilidad se define como la tasa de transmisión de vapor de agua a través de una unidad de área de material plano con espesor conocido, inducido por una diferencia de presión de vapor entre dos compartimentos separados por el material, bajo condiciones de presión atmosférica y temperatura definidas. Esta propiedad puede ser útil para entender los posibles mecanismos de transferencia de masa y las interacciones entre el vapor de agua y el polímero en las películas comestibles. (Alzate, 2017)

La permeabilidad puede ser definida como el producto de la solubilidad y la difusividad cuando las leyes de Fick y Henry se aplican plenamente. Para la mayoría de las películas comestibles, el vapor de agua interactúa fuertemente con la estructura de la matriz biopolimérica,

lo cual resulta en coeficientes de difusión y solubilidad dependientes de la fuerza impulsora (Bertuzzi *et al.*, 2007).

La transferencia de vapor de agua, depende generalmente de la porción hidrofóbica de los componentes de la película o recubrimiento comestible, ya que, a través del movimiento del vapor de agua en los polímeros, se controla la transferencia de humedad desde el producto al medio ambiente, por lo que se busca que sea lo más lento posible. Se han realizado estudios (Bósquez-Molina & Vernon-Carter, 2005; Miranda *et al.*, 2003) sobre la relación que existe entre la permeabilidad al vapor de agua y el tipo de componentes de la película o recubrimiento. Se ha observado relación entre el grosor de películas elaboradas con base de quitosano, y plastificantes como los polioles, glicerol, sorbitol, polietilenglicol encontrando que un incremento en el grosor aumenta la permeabilidad al agua (Trejo *et al.*, 2001; Arvanitoyannis *et al.*, 1997; Ramos-García *et al.*, 2010).

Park *et al.* (1994) reportan que las películas con mayor flexibilidad tienen una mayor permeabilidad al vapor de agua para el caso de formulaciones hechas a base de celulosa (metilcelulosa o hidroxipropilcelulosa) con polietilenglicol como plastificante.

### **1.3.5 Propiedades superficiales de las películas comestibles**

Las propiedades superficiales de films y recubrimientos se refieren principalmente a la capacidad de cohesión y de adhesión a la superficie de los productos alimentarios. Estas dos propiedades dependen de la capacidad del polímero para formar enlaces intermoleculares numerosos y de gran resistencia, de modo que las cadenas de polímero queden fuertemente unidas. Para la mejora de estas propiedades se emplean plastificantes, que reducen el nivel de cohesión, y surfactantes, que mejoran la capacidad de adhesión a la superficie del alimento (Ramos *et al.*, 2012).

#### **1.3.5.1 Adherencia**

La adherencia describe la capacidad de unión a una determinada superficie. Es la atracción o unión física de dos sustancias, sobre todo la atracción de sustancias diferentes que se puede observar macroscópicamente. En cintas adhesivas, la adherencia es la unión que se produce entre el adhesivo y la superficie. Los adhesivos con gran capacidad de adherencia se unen especialmente bien a las subsuperficies. En el caso de la miel, su adherencia es bastante alta, ya que pega bastante bien (tesa, 2016).

Los emulsionantes también se pueden añadir para mejorar la adherencia, como una barrera a los gases y la humedad o para mejorar la compatibilidad, por ejemplo, para permitir una buena homogeneización de los aceites esenciales en matrices hidrofílicas (Lacroix, 2009)

#### **1.3.6 Propiedades térmicas de las películas comestibles**

Se trata de una técnica que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es calentada o enfriada a velocidad constante. Es de utilidad para el conocimiento de la estabilidad térmica de un material, así como para la completa caracterización de sus transiciones. Uno de los primeros fenómenos térmicos que suele observarse al calentar un material, es un evento exotérmico, correspondiente a la relajación de las tensiones mecánicas introducidas durante el proceso de fabricación (Suriñach *et al.*, 1992).

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica de análisis térmico que está basada en la medición cuantitativa del calor absorbido o liberado por una muestra cuando es calentada, enfriada o permanece a temperatura constante. La energía absorbida o liberada por la muestra se debe a que el material en estudio, sufre un cambio físico (fusión, cristalización, transición de estructuras cristalinas, etc.) o químico (síntesis, descomposición, etc.) y es compensada por la adición o saturación de una cantidad equivalente de energía eléctrica la cuál actúa a través de un calentador localizado en el porta-muestras (Kampf, 1986).

### **1.3.6.1 Resistencia térmica**

La resistencia térmica es una propiedad del calor y una medida de la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material resiste un flujo de calor (Connor, 2020).

## **1.4 Envases biodegradables**

### **1.4.1 Definición de envases compostables y biodegradables**

Según Group (2019), empresa referente en la fabricación de materiales para “packaging” flexible, comenta que todos los plásticos compostables son biodegradables, pero no todos los plásticos biodegradables son compostables.

#### **A) Envases biodegradables:**

Se definen como aquellos fabricados con materia prima orgánica que se obtiene de fuentes renovables como el plátano, la estopa de coco, cascarilla de arroz, almidón de maíz, entre otros. Al convertirse en residuos se deshacen al ponerse en contacto con el medio ambiente convirtiéndose en biomasa y nutrientes, o por el metabolismo de los organismos. Es un proceso en el que no interviene la acción del hombre y tarda pocos años en realizar su degradación (Baqué, 2019).

#### **B) Envases Compostables:**

Se descomponen por acción microbiológica en un periodo más breve, generalmente entre 8 a 12 semanas. Se definen como aquel en el que sus materiales desechados se convierten en compost, es decir abono orgánico (Baqué, 2019).

### **1.4.2 Características de los envases biodegradables**

Según NaturePlast (s.f.), los envases biodegradables deben tener una serie de características para lograr ser un producto de calidad para los clientes, entre ellos tenemos:

- Características rígidas que permita una resistencia adecuada en su utilización, pues por ejemplo para envases del sector alimentario, es necesario que tenga un soporte de los alimentos, ya que algunos tienen un peso excesivo.
- Resistente a bajas temperaturas, pues la mayoría de estos productos son utilizados para conservar alimentos en zonas heladas, permitiendo así mantenerlos mejor durante más tiempo, y así conservar sus características organolépticas.
- Los envases biodegradables deben estar elaborados por materiales bioplásticos como el ácido láctico que posee propiedades mecánicas similares al PET (Tereftalato de polietileno), pero este es un material biodegradable.
- Mejora la huella ambiental del envase, contribuyendo así al cuidado del medio ambiente, utilizando materiales de origen biológico o coproductos, que permitan que estos envases se degraden rápidamente y evite la contaminación por plástico.

#### **1.4.3 Ventajas y desventajas del de envases biodegradables**

Como se afirma en ERENOVABLE.COM (2018), es de suma importancia analizar las ventajas y desventajas de usar envases biodegradables, ya que nos permitirá evaluar si es un proyecto viable o no.

##### **Ventajas:**

- 1) Son materiales que pueden ser consumidos por microorganismos, que contribuyen a la continuación del ciclo de vida de los seres vivos.
- 2) No eliminan ni desechan ningún tipo de elemento químico ni gases a la atmosfera, permitiendo la reducción de la huella de carbono, lo que generaría un menor impacto en los ecosistema o paisajes.

- 3) No generan residuos, pues su tiempo de vida útil es corta.
- 4) Además de fabricar envases biodegradables, se pueden producir diferentes objetos para uso cotidiano como bolsas, cubiertos, entre otros. Pues su proceso de fabricación es sencillo y barato, porque se basan en materiales naturales y no necesitan ser procesados donde intervengan sustancias tóxicas.
- 5) Las personas que utilizan este tipo de envases están contribuyendo al cuidado del medio ambiente, permitiendo así reducir el plástico, el cual contiene alto porcentaje de propiedades cancerígenas que afectan la salud de los seres vivos.

**Desventajas:**

- 1) Al utilizar productos agrícolas como el maíz, coco, entre otros. Se tiene una alta incertidumbre, por la cual se depende de la producción de estos a lo largo del año, pues se producen en ciertas temporadas, perjudicando así la productividad y rentabilidad de estos productos.
- 2) Generalmente los envases biodegradables utilizados no terminan en los sistemas de compostaje adecuado, esto quiere decir que culminan en los basureros, lugares que no poseen las condiciones adecuadas para su correcta descomposición.
- 3) La aceptación por parte de los clientes, pues se le es difícil distinguir entre un plástico normal y uno biodegradable, teniendo en cuenta que posean las mismas características y les perjudiquen a la salud; es por eso por lo que deben tener un buen estudio de mercado y una red de acogida y demostración hacia los consumidores.

## **1.5 Vasos biodegradables**

Los vasos biodegradables se fabrican con componentes naturales; materia prima como almidón, celulosa, caucho natural, proteínas, plátano, yuca, legumbres, polisacáridos, poliácidos, aceite de soja, fécula de patata, fécula de maíz, fécula del trigo, entre otras (Eden , s.f.).

Esta materia prima, al final de su vida, se descompone en un período de tiempo breve; los microorganismos restantes sirven a las plantas de abono orgánico. Dentro de los materiales mencionados, el más habitual es el almidón, un polímero natural, principalmente el que procede de la fécula de y del trigo patata, del maíz. El almidón de patata es el polímero del que se obtienen mejores resultados actualmente: aparte de ser reciclable e inagotable, presenta una vida muy corta y tiene un alto rendimiento en el conreo de tierras, potenciando el sector agrícola. Además de esto, los vasos biodegradables han demostrado ser capaces de reducir notablemente los costes de producción. Un nuevo plástico 100% natural, orgánico, respetuosos con el planeta y mucho más económico (Eden , s.f.).

### **1.5.1 Formato y comercialización**

Según Eden (s.f.), la comercialización de los vasos biodegradables ya está en marcha, y la producción industrial de estos vasos ya está en vías de ser algo normalizado. Su comercialización acostumbra a presentar las siguientes características:

- A) Los vasos están fabricados con celulosa reciclada.
- B) Su laminación interior es de Polímero Biodegradable derivado del almidón de maíz (PLA).
- C) Alto gramaje.
- D) Diseño ecológico.

- E) Están diseñados para contener líquidos fríos y calientes; soportan desde 0 hasta 85 °C.
- F) En una planta de compostaje se convierten en compost en un período de sólo 90 días.
- G) Ahorran CO<sub>2</sub>.

## **1.5.2 Hoja de maíz**

### **1.5.2.1 Generalidades**

Las hojas del maíz son alargadas y un poco onduladas, salen alternas, su aspecto en el borde de la hoja es áspero, nacen muy pegadas al tallo y es donde se desarrollan las mazorcas. Se dice que las hojas tienen una gran importancia en el desarrollo y evolución de los granos. Dependiendo de cómo se cultiva una planta de maíz puede tener de 12 a 24 hojas (delMaiz.info, 2021).

México es el sexto mayor productor de maíz a nivel mundial con una producción de 24.5 millones de toneladas (Mendoza Escamilla, 2012). Y está muy arraigado la cultura del maíz y se utiliza para preparar diversos platillos que incluyen tanto el grano como la hoja. Si se utiliza este material para fabricar envases se podría evitar deforestaciones innecesarias (Prado-Martínez *et al.*, 2012).

En México, se desperdician 10 toneladas de hoja de maíz que son utilizados principalmente para preparar alimentos en especial para hacer tamales (Mendoza Escamilla, 2012) . Las hojas simplemente se van a la basura mezcladas con toda clase de residuos orgánicos e inorgánicos, y solo el 1% se recupera para hacer artesanías (Mendoza Escamilla, 2012).

### 1.5.2.2 Composición de las hojas de maíz

Las características físicas de las fibras de la hoja de maíz permiten la fabricación de papel, así lo señalan en el estudio de química y morfología del maíz. El estudio señala que el contenido de holocelulosa contenido en las hojas del maíz es adecuado para fabricar papel, y adecuado para fabricar una caja (Prado-Martínez *et al.*, 2012).

**Cuadro 4.** Composición química de la hoja de mazorca de maíz (Prado-Martínez *et al.*, 2012).

| Compuesto    | Hoja de mazorca (% base seca) |
|--------------|-------------------------------|
| Holocelulosa | 78.86                         |
| a-Celulosa   | 43.14                         |
| Lignina      | 23.00                         |
| Cenizas      | 0.761                         |

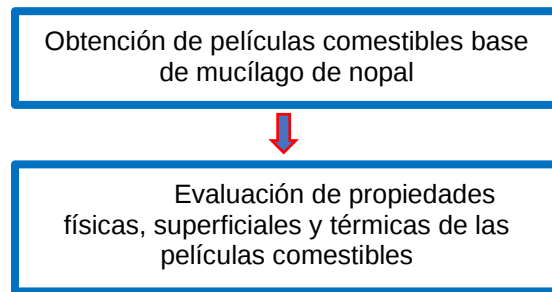
De acuerdo al Cuadro 4, la hoja de mazorca de maíz tiene 78, 86 %. Los porcentajes de Holocelulosa se encuentran entre (67%-70%) que se usan comúnmente para hacer pulpa para papel (Hurter, 2001).

### 1.5.2.3 Descripción de los elementos que conforman a la hoja de mazorca de maíz

La planta de maíz está clasificada dentro del grupo de las monocotiledóneas, las cuales transportan las sales disueltas y los fotosintatos, desde las raíces hacia las hojas, y viceversa, a través de los vasos de xilema y floema. Estos vasos, están reforzados por fibras, conformando, junto con tejido parenquimático, los haces fibrovasculares que se ordenan en nervaduras paralelinervas en toda la lámina. De estos haces fibrovasculares se obtienen las fibras que son materia prima para producir papel (Prado-Martínez *et al.*, 2012).

## CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

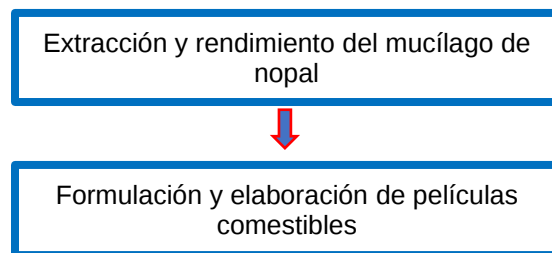
En el diagrama de flujo de la Figura 4, se observa de manera general, el desarrollo de la parte experimental del proyecto, la cual consistió en dos pasos: a) obtener películas comestibles a base de biopolímeros biodegradables y b) su posterior evaluación.



**Figura 4.** Desarrollo experimental del proyecto.

### 2.1 Obtención de películas comestibles a base de mucílago de nopal

En la Figura 5, se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de películas comestibles a base de mucílago de nopal.



**Figura 5.** Proceso de obtención de películas comestibles a base de mucílago de nopal.

#### 2.1.1 Extracción y rendimiento del mucílago de nopal

Se utilizó el método de Zavala (2012) con algunas modificaciones (Figura 6). Se seleccionaron los nopales (*Nopalea auberi* (Pfeiff.) Salm-Dyck), se lavaron y se realizó el desespinado para poder manipular las capas de los cladodios.



**Figura 6.** *Proceso de extracción del mucílago de nopal.*

Se cortaron los nopales en mitades y se extrajo el parénquima. Se pesó en una balanza analítica de precisión (Ohaus Adventurer) para obtener el rendimiento. El parénquima se licuó en una licuadora Osterizer por 30 seg hasta su homogeneización. Se calentó la mezcla hasta llegar a 50°C en un agitador digital con calefacción (Thermo Scientific) a 83 °C por 700 rpm, posteriormente se dejó reposar 1 h y se centrifugó (Centrífuga Oshion) a 4000 rpm por 20 min. En un contenedor de plástico hermético, se precipitó el mucílago extraído contenido en el sobrenadante, se agregó etanol (SAÚDE) al 96% (v/v) en una proporción 2:1 (alcohol/mucílago) y se dejó reposar a temperatura ambiente por 18 h. Se recuperó el mucílago aglomerado por decantación utilizando un colador metálico y se filtró a vacío (bomba de vacío weg) por 5 min. El mucílago se secó a 45°C por 3 h en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) y finalmente, se pulverizó con un mortero. Se obtuvo el rendimiento.

Se determinó el rendimiento del mucílago de nopal, para lo cual se utilizó el peso del parénquima y el peso del mucílago de nopal en polvo. Se utilizó la ecuación 1 propuesta por Vargas Rodríguez *et al.* (2018).

$$R = \frac{P_M}{P_P} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

**R:** Rendimiento del mucílago de nopal (%)

**P<sub>M</sub>:** Peso del mucílago de nopal obtenido (g)

**P<sub>P</sub>:** Peso del parénquima de cada lote (g)

### 2.1.2 Formulación de películas comestibles

Se elaboraron las películas comestibles, por triplicado, utilizando Glicerol (G), Polietilenglicol E-4000 (E-4000), Mucílago de nopal (MN) e Hidroxietilcelulosa (HEC). (Ver Cuadro 5).

Las películas comestibles M4-0.5, M5-0.8, M6-1.0 y M7-1.5 están designadas como películas control para observar el comportamiento de cada concentración de hidroxietilcelulosa y del mucílago de nopal.

**Cuadro 5.** *Formulación de las películas comestibles.*

| Mezcla | G        | E-4000   | MN         | HEC        |
|--------|----------|----------|------------|------------|
| M1-08  | 4% (v/v) | 4% (m/v) | 0.5% (m/v) | 0.8% (m/v) |
| M2-1.0 | 4% (v/v) | 4% (m/v) | 0.5% (m/v) | 1% (m/v)   |
| M3-1.5 | 4% (v/v) | 4% (m/v) | 0.5% (m/v) | 1.5% (m/v) |
| M4-0.5 | X        | X        | 0.5% (m/v) | x          |
| M5-0.8 | X        | X        | X          | 0.8% (m/v) |
| M6-1.0 | X        | X        | X          | 1% (m/v)   |
| M7-1.5 | X        | X        | X          | 1.5% (m/v) |

### 2.1.3 Elaboración de películas comestibles

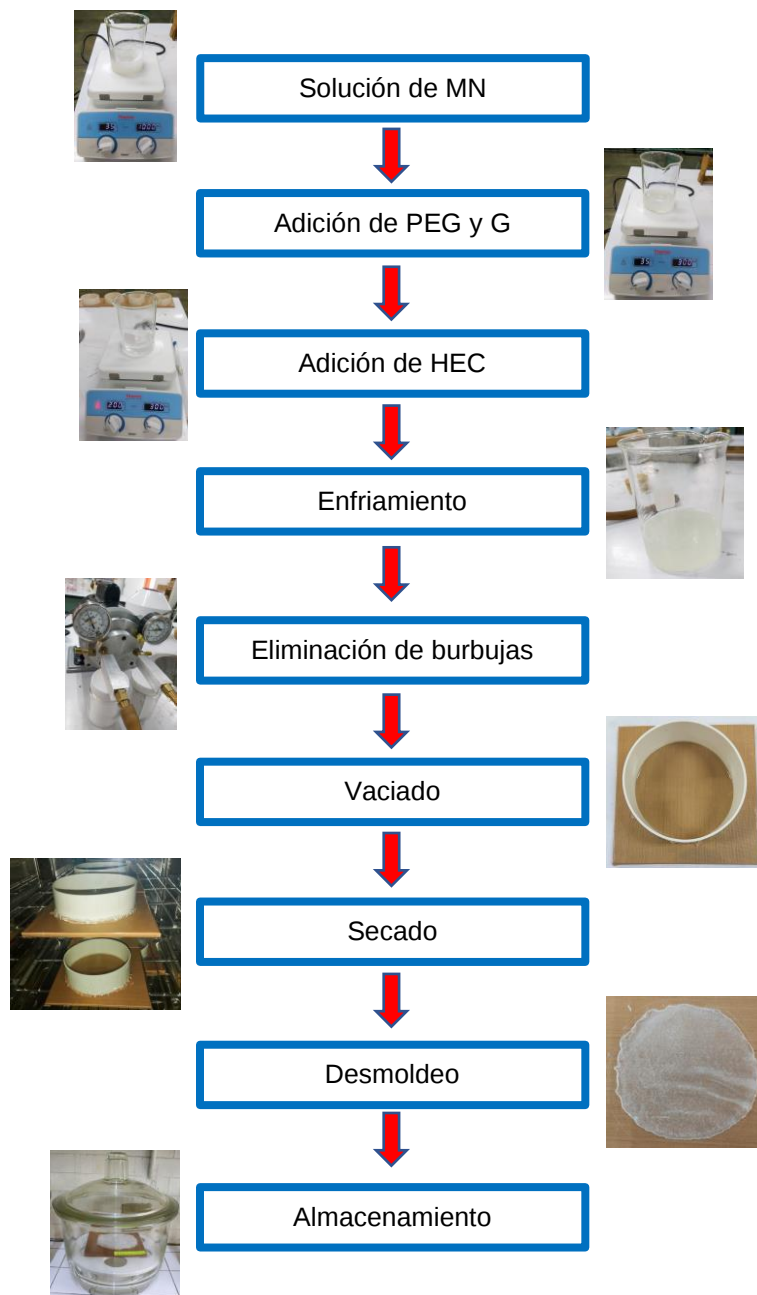
En la Figura 7, se presenta el diagrama general del proceso de elaboración de las películas comestibles a base de mucílago de nopal.

Se preparó una solución de mucílago de nopal (MN) al 0.5 % (m/v). Se adicionó lentamente el polvo de mucílago de nopal al agua destilada a 35° C y 500 rpm, con la ayuda de agitador digital con calefacción (Thermo Scientific), posteriormente se aumentó la velocidad a 1000 rpm por 1 h hasta obtener una mezcla homogénea. Al disminuir la temperatura de la solución a 27°C, se centrifugó por 10 min a 500 rpm para eliminar burbujas y se vació en un nuevo vaso de precipitados. Se agregó 4% de polietilenglicol (PEG, Cosmopolita) manteniendo la agitación por 5 min a 300 rpm, y, finalmente, se adicionó un 4% de glicerol (G, Meyer). Por separado, se preparó una solución de hidroxietilcelulosa (HEC, Z-Cell) de acuerdo a la concentración correspondiente a la mezcla 1 utilizando un agitador digital con calefacción (Thermo Scientific) a 200° C por 300 rpm hasta 75°C. Una vez hecha la mezcla, ésta se adicionó a la solución que contenía el mucílago de nopal, manteniendo agitación constante. Se dejó enfriar

40 min y se desgasificó la solución formada. El mismo procedimiento se utilizó para elaborar la mezcla 2 y 3. Se vertieron 30 ml de solución en bases de teflón delimitados con aros de PVC. Se dejaron secar en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) por 24 horas para la concentración de 0.8%, y 21 horas para las concentraciones de 1% y 1.5% de hidroxietilcelulosa (HEC, Z-Cell). Finalmente, se desmoldaron y se acondicionaron a  $22^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  y  $35\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$  en un desecador hasta su análisis.

Para elaborar la película control de la mezcla 4, se preparó una solución de mucílago de nopal (MN) al 0.5 % (m/v). Se adicionó lentamente el polvo de mucílago de nopal al agua destilada a  $35^{\circ}\text{C}$  y 500 rpm, con la ayuda de agitador digital con calefacción (Thermo Scientific), posteriormente, se aumentó la velocidad a 1000 rpm por 1 h hasta obtener una mezcla homogénea. Al disminuir la temperatura de la solución a  $27^{\circ}\text{C}$ , se centrifugó por 10 min a 500 rpm para eliminar burbujas y se vació en un nuevo vaso de precipitados. Se vertieron 30 ml de solución en bases de teflón delimitados con aros de PVC. Se dejaron secar en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) por 24 horas. Finalmente, se desmoldaron y se acondicionaron a  $22^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  y  $35\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$  en un desecador hasta su análisis.

En el caso de las películas control restantes, se preparó una solución de hidroxietilcelulosa (HEC, Z-Cell) de acuerdo a la concentración correspondiente a la mezcla 5 utilizando un agitador digital con calefacción (Thermo Scientific) a  $200^{\circ}\text{C}$  por 300 rpm hasta  $75^{\circ}\text{C}$ . Se dejó enfriar 40 min y se desgasificó la solución. El mismo procedimiento se utilizó para elaborar la mezcla 6 y 7. Se vertieron 30 ml de solución en bases de teflón delimitados con aros de PVC. Se dejaron secar en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) por 24 horas para la concentración de 0.8%, y 21 horas para las concentraciones de 1% y 1.5% de hidroxietilcelulosa (HEC, Z-Cell). Finalmente, se desmoldaron y se acondicionaron a  $22^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  y  $35\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$  en un desecador hasta su análisis.



**Figura 7.** Proceso de elaboración de películas comestibles a base de mucílago de nopal.

## 2.2 Evaluación de propiedades físicas, superficiales y térmicas de las películas comestibles

### 2.2.1 Evaluación de propiedades físicas

#### 2.2.1.1 Espesor

La medición del grosor de las películas comestibles se realizó de acuerdo al método de Orozco E. (2017).

El espesor fue medido en 8 posiciones aleatorias para cada película utilizando un micrómetro analógico de 0 a 25 mm marca OBI, el promedio fue considerado como el espesor final en mm.

#### 2.2.1.2 Solubilidad

La solubilidad de las películas comestibles en agua se realizó según el método de Gheribi *et al.* (2018).

Las muestras de película de 2 cm x 2 cm se secaron en horno de secado horizontal (ECOSHEL) a 90 ° C durante 24 h, se enfriaron a temperatura ambiente en un desecador, se pesaron ( $m_i$ ) en una balanza analítica de precisión (Ohaus Adventurer), y posteriormente, se sumergieron en 50 ml de agua destilada a 25 °C durante 30 min. Las piezas no disueltas se secaron en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) a 90°C por 24 h y se pesaron ( $m_f$ ) después de enfriar a temperatura ambiente. La solubilidad en agua de las películas se calculó según la ecuación 2.

$$S = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$S$ : Solubilidad de la película comestible (%)

$m_i$ : Peso inicial de la muestra (g)

*mf*: Peso final de la muestra (g)

### **2.2.1.3 Permeabilidad al vapor de agua**

Según Carballo & Martínez (2010), las técnicas gravimétricas son comúnmente utilizadas para determinar la permeabilidad al vapor de agua en películas comestibles. Para evaluarla, se utiliza el método ASTM E96/ E96M-05. Existen dos técnicas, la que emplea desecante y la que utiliza agua, y esta última tiene dos variantes agua y agua invertida. En este proyecto de investigación se utilizó la técnica que usa desecante. Todas las pruebas se realizaron por triplicado.

Las muestras se colocaron en cajas Petri de 1.4 cm de altura por 5.4 cm de diámetro interno, se agregaron 8 g de Gel de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de marca Meyer previamente desecado y llevado a peso constante, luego se procedió a cubrir la película comestible sobre la parte superior de la caja Petri y se selló con bandas de hule. Se dejaron dentro de la cámara de prueba (desecador), bajo ciertas condiciones de %HR ( $35\% \pm 2$ ) y temperatura ( $22^\circ\text{C} \pm 0.7$ ) utilizando un medidor de humedad relativa y temperatura (higrómetro digital marca HTC-2). La ganancia o pérdida de peso de cajas Petri se monitoreó en función del tiempo, obteniéndose datos suficientes para graficar la ganancia de peso vs tiempo. Los cambios de peso se registraron, mediante una balanza analítica de precisión (Ohaus Adventurer), cada hora durante 3 días registrando 7 pesos por día. El área de transferencia de vapor de agua a través de la película ( $\pi r^2$ ) fue  $2.2902 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Se consideró una presión de vapor de saturación de 2,642.925832 Pa a  $22^\circ\text{C}$ .

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para calcular la determinación de la permeabilidad del vapor de agua de las películas comestibles a base de mucílago de nopal.

$$A_n = P_t - P_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$A_n$ : Ganancia de peso en la caja Petri en un periodo determinado (*Fracción*).

$P_t$ : Peso de la caja Petri tomado en un tiempo desconocido ( $g$ ).

$P_i$ : Peso inicial de la caja Petri en el ensayo ( $g$ ).

$$WVT = \frac{dm}{dt} * \frac{1}{A} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$WVT$ : Índice de transferencia al vapor de agua o coeficiente de transmisión de vapor de agua  $\left(\frac{g}{hm^2}\right)$ .

$\frac{dm}{dt}$ : Diferencia de masa a través del tiempo  $\left(\frac{g}{h}\right)$ .

$A$ : Área de la película expuesta ( $m^2$ ).

$$Pe = \frac{WVT}{S(R_1 - R_2)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$Pe$ : Permeanza  $\left(\frac{g}{hm^2Pa}\right)$

$WVT$ : Índice de transferencia al vapor de agua o coeficiente de transmisión de vapor de agua  $\left(\frac{g}{hm^2}\right)$ .

$S$ : Presión de vapor de saturación a la temperatura experimental ( $Pa$ )

$R_1$ : Humedad relativa de la cámara (*Fracción*)

$R_2$ : Humedad relativa interna de la caja Petri (*Fracción*)

$$PVA = Pe * Gr$$

(Ecuación 6)

**PVA** : Permeabilidad al vapor de agua  $\left(\frac{gmm}{hm^2Pa}\right)$

**Pe**: Permeanza  $\left(\frac{g}{hm^2Pa}\right)$

**Gr**: Grosor (mm)

## 2.2.2 Evaluación de propiedades superficiales

### 2.2.2.1 Adherencia

La adherencia de las películas comestibles sobre las láminas a base de hojas de elote se ensayó por triplicado. A muestras de láminas a base de hojas de elote (Zea Mays), de 4 cm x 4 cm, se roció agua destilada con la ayuda de un atomizador en la parte frontal de las mismas; posteriormente, las muestras de películas de 4 cm x 4 cm se colocaron sobre las láminas y se secaron en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) a 50°C durante 1 h y se almacenaron en un desecador a temperatura ambiente.

## 2.2.3 Evaluación de propiedades térmicas

### 2.2.3.1 Resistencia térmica

La resistencia térmica de las películas comestibles en agua se ensayó por triplicado. Para la evaluación, se consideraron las siguientes temperaturas: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C y 95°C (temperatura de ebullición).

Las muestras de película de 2 cm x 2 cm se pesaron (*mi*) en una balanza analítica de precisión (Ohaus Adventurer), se colocaron en vasos de precipitados de 50 ml de agua destilada con la ayuda de un agitador digital con calefacción (Thermo Scientific) a la temperatura correspondiente por 10 min, se secaron en un horno de secado horizontal (ECOSHEL) a 90°C durante 40 min y se pesaron (*mf*) después de enfriar en un desecador a temperatura ambiente.

La resistencia térmica de las películas comestibles se calculó con la ecuación 7.

$$RT = 100 - S \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

**RT**: Resistencia térmica de la película comestible (%).

**S**: Solubilidad de la película comestible (%).

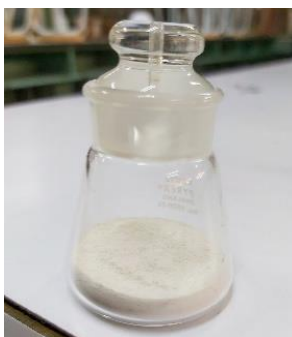
## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1 Películas comestibles a base de mucílago de nopal

#### 3.1.1 Rendimiento de mucílago de nopal

Con los datos obtenidos (ver Anexo B), se registraron 13.2004 g de mucílago de nopal como se puede ver en la Figura 8, ya que se ocuparon 27 lotes de nopales (*Nopalea auberi* (Pfeiff.) Salm-Dyck) con un peso de 9.374 kg de parénquima del nopal, por lo tanto, el rendimiento del mucílago de nopal fue de 0.1408 %. Se obtuvo un polvo blanquecino y es soluble en agua. Comparando con el Cuadro 3, el rendimiento de mucílago de nopal presentó un valor por debajo de los rendimientos obtenidos por Sáenz & Sepúlveda (1993), Sepúlveda *et al.* (2007), Abraján-Villaseñor (2008) y Rodríguez (2010). Por otro lado, mostró un valor por encima de los rendimientos obtenidos por Cárdenas *et al.* (1997) y Majdoub *et al.* (2001).

El contenido de mucílago en el nopal depende de las condiciones ambientales, tales como frío o lluvia debido a la habilidad de sus polisacáridos de absorber agua como un mecanismo de defensa en caso de enfrentar condiciones de estrés (Sepúlveda *et al.*, 2007).



**Figura 8.** Mucílago de nopal en polvo.

#### 3.1.2 Obtención de las películas comestibles

Las películas comestibles presentaron características similares, lo cual se diferenciaron por su espesor, color, facilidad de desmoldeo, el tiempo de secado, apariencia, número de películas obtenidas y presencia de burbujas.

La película M1-0.8 (a), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia áspera color blanco, tuvo la facilidad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.19125 mm y se obtuvieron 5 películas por ensayo, lo cual se llevó 24 horas de secado.

La película M2-1.0 (b), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia áspera color blanco, tuvo la facilidad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.25750 mm y se obtuvieron 5 películas por ensayo, lo cual se llevó 21 horas de secado.

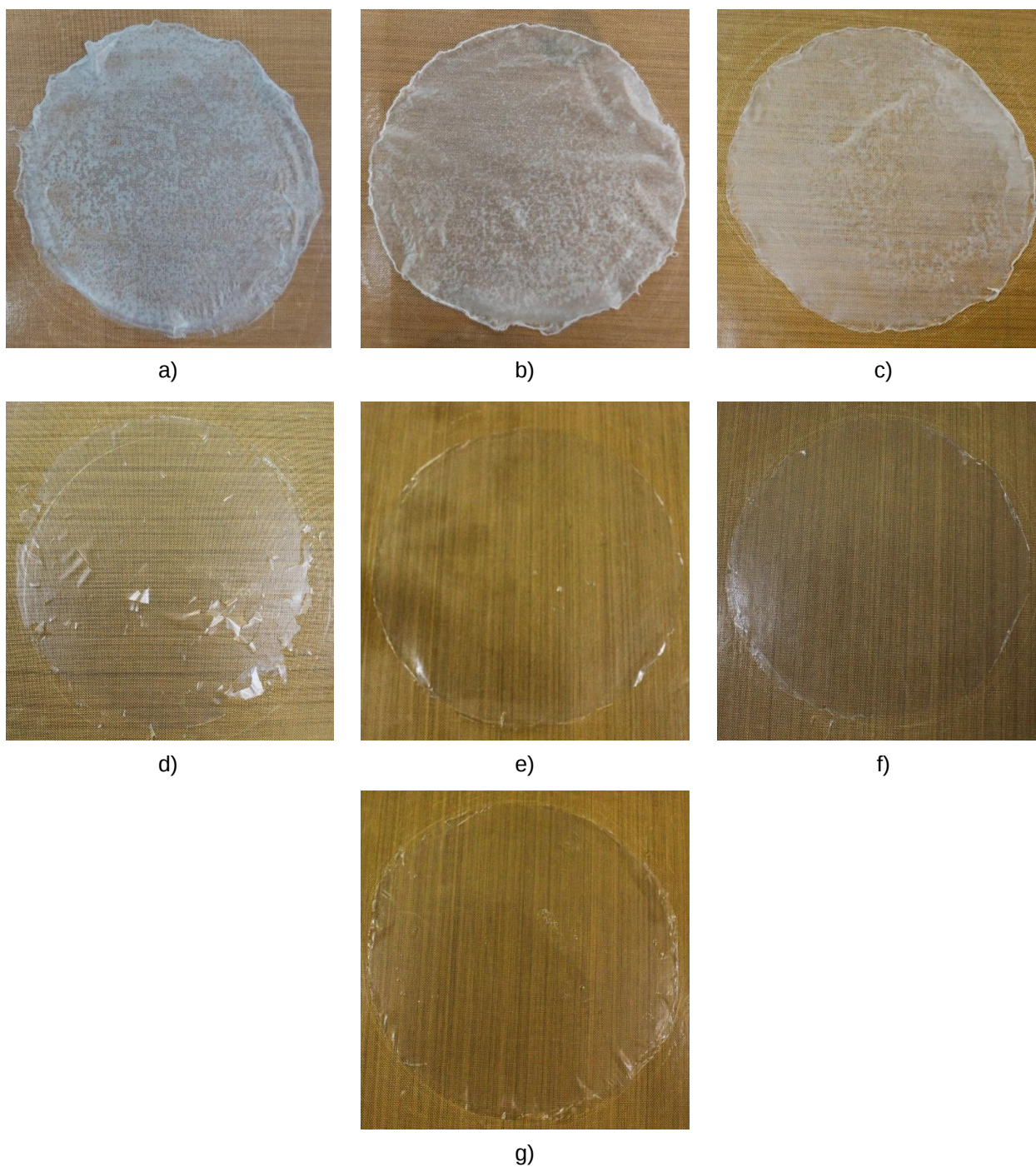
La película M3-1.5 (c), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia áspera color blanco, tuvo la dificultad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.35375 mm y se obtuvieron 5 películas por ensayo, lo cual se llevó 21 horas de secado.

La película M4-0.5 (d), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia quebradiza color blanco, no tuvo la facilidad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.020 mm y se obtuvieron 3 películas por ensayo, por lo cual se llevó 24 horas de secado.

La película M5-0.8 (e), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente, tuvo la facilidad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.05375 mm y se obtuvieron 3 películas por ensayo, por lo cual se llevó 24 horas de secado.

La película M6-1.0 (f), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente, tuvo la facilidad de desmoldeo, sin burbujas, con un espesor de 0.06750 mm y se obtuvieron 3 películas por ensayo, por lo cual se llevó 21 horas de secado.

La película M7-1.5 (g), Figura 9) presentó una capa delgada con una apariencia lisa color transparente, tuvo la facilidad de desmoldeo, presentó poca presencia de burbujas, con un espesor de 0.0950 mm y se obtuvieron 2 películas por ensayo, por lo cual se llevó 21 horas de secado.



**Figura 9.** Películas comestibles a base de mucílago de nopal a) M1-0.8, b) M2-1.0, c) M3-1.5, d) M4-0.5, e) M5-0.8, f) M6-1.0, g) M7-1.5.

En el Cuadro 6, se muestra el resumen de las características de las películas comestibles, lo cual se consideró la apariencia, el espesor, las películas formadas y el tiempo de secado.

**Cuadro 6.** Características de las películas comestibles.

| Película | Apariencia               | Espesor (mm) | Películas formadas | Tiempo de secado (h) |
|----------|--------------------------|--------------|--------------------|----------------------|
| M1-0.8   | Áspera, color blanco     | 0.19125      | 5                  | 24                   |
| M2-1.0   | Áspera, color blanco     | 0.25750      | 5                  | 21                   |
| M3-1.5   | Áspera, color blanco     | 0.35375      | 5                  | 21                   |
| M4-0.5   | Quebradiza, color blanco | 0.02000      | 3                  | 24                   |
| M5-0.8   | Lisa, color transparente | 0.05375      | 3                  | 24                   |
| M6-1.0   | Lisa, color transparente | 0.06750      | 3                  | 21                   |
| M7-1.5   | Lisa, color transparente | 0.09500      | 2                  | 21                   |

Las formulaciones APG (1% m/v solución mucílago, 1.5% v/v glicerol, 1.5% v/v polietilenglicol, 0.1% v/v ácido oleico), BPG (solución mucílago 1% m/v, 5% v/v glicerol, 5% v/v polietilenglicol, 0.3% v/v ácido oleico) y CPG (solución mucílago 1% m/v, 3% v/v glicerol, 3% v/v polietilenglicol, 0.5% v/v ácido oleico) obtuvieron un espesor de 0.222 mm, 0.254 mm y 0.254 mm, respectivamente (González-González, 2011). Se observa que coinciden con la película M2-1.0 (4% v/v glicerol, 4% m/v polietilenglicol, 0.5% m/v solución mucílago y 1.0% m/v de hidroxietilcelulosa) con un espesor de 0.25750 mm.

Las películas con 1% de HPMC (hidroxipropilmetilcelulosa) fueron más gruesas que las del 0.5% de HPMC (hidroxipropilmetilcelulosa) y glicerol, por lo que su manipulación se hizo más sencilla, se pudo notar una mejor incorporación del glicerol y HPMC en la mezcla, la solución filmogénica no presentó burbujas. Una vez transcurridas las 24 h de secado en el horno, las

películas se pudieron despegar perfectamente. Posteriormente, su manipulación fue sencilla, las películas fueron maleables y no mostraban exudación de plastificante (Solis, 2016).

Considerando los datos de los espesores de las películas comestibles por parte de Solis (2016), las formulaciones de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) sin glicerol: HPMC 0.5%, HPMC 1.0%, HPMC 1.5%, HPMC 2.0% presentaron valores de 0.0226 mm, 0.0279 mm, 0.0392 mm, 0.0567 mm, respectivamente. Comparando con las películas control de hidroxietilcelulosa (HEC): la película comestible M5-0.8, M6-1.0, M7-1,5 obtuvieron espesores de 0.05375 mm, 0.0675 mm 0.095 mm, sin embargo, se observa que son valores muy bajos por lo que la mayoría de las películas comestibles hechas de un algún tipo de celulosa presentan una capa muy delgada. Las películas comestibles a base de HPMC son más delgadas que las películas comestibles de HEC.

(García , 2017) reporta que, de manera general, tanto las películas de proteína aislada de suero lácteo como las de gelatina de pescado resultaron ser de superficie homogénea a simple vista, lisas y transparentes. Se ha podido comprobar que la adición de extracto de hinojo marino produce un cambio en la coloración de los films, especialmente en los de mayor concentración, produciendo colores que oscilan entre el amarillo y el verde.

### **3.2 Propiedades físicas, superficiales y térmicas**

#### **3.2.1 Propiedades físicas**

##### **3.2.1.1 Espesor**

Según los resultados del espesor (ver Anexo C), el grosor de las películas comestibles y películas comestibles control varían de acuerdo a la concentración de hidroxietilcelulosa, como se observa en el Cuadro 7.

De acuerdo al marco teórico, se utilizó la concentración de geles fluidos (0.8%-1.5%) para tener una buena consistencia de las películas comestibles M1-0.8, M2-1.0, M3-1.5 y hacer las evaluaciones correspondientes; por otro lado, al aumentar la concentración (1.5% en adelante),

se comporta como agente endurecedor y no forma una película óptima, lo cual no permite la formación de películas comestibles.

**Cuadro 7.** *Espesor de las películas comestibles.*

| Películas comestibles | Espesor (mm) |
|-----------------------|--------------|
| M1-0.8                | 0.19125      |
| M2-1.0                | 0.25750      |
| M3-1.5                | 0.35375      |
| M4-0.5                | 0.02000      |
| M5-0.8                | 0.05375      |
| M6-1.0                | 0.06750      |
| M7-1.5                | 0.09500      |

De acuerdo al cuadro 7, la película control M4-0.5 obtuvo un espesor muy bajo, porque solamente se utilizó 0.5% (m/v) de mucílago de nopal, por lo que no se formó una buena película por su apariencia quebradiza, ya que se necesita un buen agente formador de película como la HEC. La película control M5-0.8 obtuvo un espesor mínimo, debido a la concentración mínima de 0.8% (m/v) de hidroxietilcelulosa, por lo que se formó una buena película muy delgada.

El espesor de la película comestible M3-1.5 (Figura 10) que presentó un valor de 0.35375 mm es mayor que la película M1-0.8 obteniendo un valor 0.19125 mm. Estos espesores son mayores a los reportados por Soazo *et al.* (2011) y Abugoch *et al.* (2011) que realizaron películas comestibles de proteína de suero con cera de abeja y quitosano con proteína, reportando espesores de 0.154 mm y de 0.125-0.142 mm, respectivamente. Además de los reportados por Espino-Díaz *et al.* (2010) que son de 0.131 y 0.1095 mm para películas de mucílago de nopal con y sin calcio, respectivamente.

Por otro lado, los espesores de las películas evaluadas en este trabajo son similares a los reportados por Murillo-Martínez *et al.* (2011) para películas de proteína de suero con carboximetilcelulosa y proteína de suero con pectina de bajo metoxilo (0.185 y 0.200 mm, respectivamente). Además de los descritos por Abraján-Villaseñor (2008) quien también trabajó

con mucílago de nopal (0.209, 0.198-0.209 y 0.215-0.223 mm para películas con mucílago de nopal, mucílago de nopal con ácido oleico y mucílago de nopal con ácido esteárico, respectivamente), aunque mayores a los obtenidos por Muñoz *et al.* (2012) y Monedero *et al.* (2009) que realizaron películas con mucílago de semilla de chía con proteína de suero concentrada y glicerol y de proteína de soya con cera de abeja y ácido oleico, reportando espesores de 0.090-0.110 y 0.099-0.113 mm, respectivamente.



**Figura 10.** Medición del espesor de la película comestible M3-1.5.

Las películas comestibles que contienen hidroxietilcelulosa a base de mucílago de nopal presentan espesores mucho más grandes que las de control.

De acuerdo con Solis (2016), menciona que el glicerol, utilizado como plastificante en estas películas, aporta un mayor grosor para la película en cada una de las formulaciones, lo cual puede ser benéfico o perjudicial, dependiendo del uso final que se le dé a la película. En las películas con glicerol y hidroxipropilmetilcelulosa (1.5, 2%: 0.0583 mm, 0.05842 mm, respectivamente), el espesor no sigue la tendencia de incremento, lo cual puede ser debido a una menor incorporación de glicerol en la matriz polimérica, lo cual dio lugar a películas más compactas y densas (Solis, 2016).

Sin embargo, cuando aumenta la concentración de HEC, aumenta el grosor de las películas comestibles pero la concentración máxima de la hidroxietilcelulosa es del 1.5%, lo cual sugiere aumentar la concentración del glicerol para tener mayor espesor de las películas comestibles y obtener buenos resultados al hacer la evaluación de resistencia térmica, de solubilidad y de permeabilidad al vapor de agua.

### **3.2.1.2 Solubilidad**

De acuerdo con los cálculos (ver Anexo D), en el Cuadro 8, se muestran los resultados para llegar a los valores de solubilidad en agua de cada película comestible que se realizaron en la prueba. Podemos ver que la película M1-0.8 es más soluble con un contenido de 76.8498 % que la película M3-1.5 con un 66.9957 % y eso nos da a entender que la película M3-1.5 presenta mayor resistencia al agua.

**Cuadro 8.** Solubilidad de las películas comestibles.

| Película | S(%)    |
|----------|---------|
| M1-0.8   | 76.8498 |
| M2-1.0   | 69.4169 |
| M3-1.5   | 66.9957 |

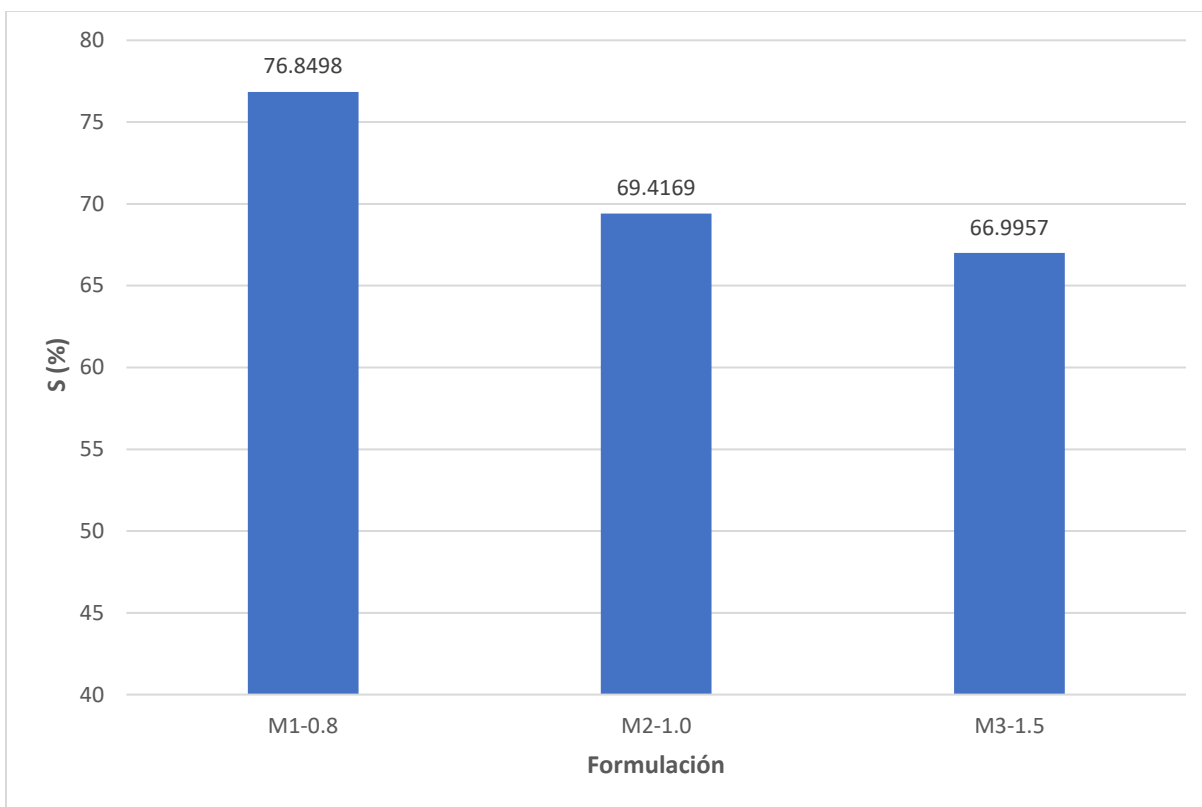
Los valores promedio de solubilidad en agua se presentan en la Figura 11 y como se observa, el porcentaje de materia soluble en agua disminuye al aumentar el porcentaje de hidroxietilcelulosa, como es el caso de la formulación M1-0.8 (4%v/v de glicerol, 4%m/v de polietilenglicol, 0.5%m/v de mucílago de nopal y 0.8%m/v de hidroxietilcelulosa) y la formulación M2-1.0 (4%v/v de glicerol, 4%m/v de polietilenglicol, 0.5%m/v de mucílago de nopal y 1.0%m/v de hidroxietilcelulosa) presentaron mayores valores de solubilidad, por el contrario, la formulación M3-1.5 compuesta por 4%v/v de glicerol, 4%m/v de polietilenglicol, 0.5%m/v de mucílago de nopal y 0.8%m/v de hidroxietilcelulosa presenta un menor porcentaje de materia soluble en agua.



**Figura 11.** Prueba de solubilidad de las películas comestibles en agua

Sin embargo, las películas comestibles que contienen mayor porcentaje de hidroxietilcelulosa presentan un menor porcentaje de solubilidad en agua; es decir, son más resistentes a una temperatura ambiente en agua.

Los valores de solubilidad obtenidos por dichas películas multicapa se deben al carácter hidrofílico que presentan los derivados de celulosa, el cual se debe a la estructura del material, ya que a diferencia de la celulosa que presenta una estructura altamente cristalina, los derivados de celulosa poseen una estructura generalmente amorfa lo que hace que sean más susceptible a interaccionar con moléculas de agua (Adinugraha & Marseno, 2005). Particularmente de la carboximetilcelulosa, presenta grupos hidroxilos libres con los cuales pueden interaccionar las moléculas de agua aumentando la solubilidad de la misma (Rachtanapun *et al.*, 2012; Yadollahi *et al.*, 2014).



**Gráfica 12.** Solubilidad de películas comestibles a base de mucílago de nopal con diferentes concentraciones de HEC.

De la Gráfica 12, la solubilidad de las películas comestibles disminuyó a medida que se incrementaba el contenido de hidroxietilcelulosa, puesto que la película M1-0.8 es más soluble con un valor de 76.8498 % que la película M3-1.5 con 66.9957 %.

Espinel *et al.* (2014) reportaron que una disminución en el contenido de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y un aumento en el contenido de almidón de mandioca, disminuía la solubilidad. Lo anterior sugiere que la adición de almidón a las películas comestibles a base de mucílago de nopal puede ser menos soluble con el agua y así podría obtener mejores resultados, no solamente en la evaluación de solubilidad, si no también en la prueba de permeabilidad al vapor de agua y de resistencia térmica.

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible controlar la solubilidad de películas comestibles elaboradas con mucílago de nopal, cambiando la proporción de los biopolímeros usados en este proyecto, es decir; aumentando la concentración de hidroxietilcelulosa y del mucílago de nopal y se añadiría un nuevo biopolímero como el almidón.

### 3.2.1.3 Permeabilidad al vapor de agua

En base con los cálculos realizados de la permeabilidad al vapor de agua (ver Anexo E), en el Cuadro 9, se muestra el resumen de los resultados obtenidos de permeabilidad al vapor de agua de cada película comestible.

**Cuadro 9.** Permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles.

| Película | $\frac{dm}{dt} \left( \frac{g}{h} \right)$ | $WVT \left( \frac{g}{hm^2} \right)$ | $Pe \left( \frac{g}{hm^2Pa} \right)$ | $PVA \left( \frac{gmm}{hm^2Pa} \right)$ |
|----------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| M1-0.8   | 0.01495                                    | 6.52780                             | $7.0569 \times 10^{-03}$             | $1.3496 \times 10^{-03}$                |
| M2-1.0   | 0.01410                                    | 6.15665                             | $6.6557 \times 10^{-03}$             | $1.7138 \times 10^{-03}$                |
| M3-1.5   | 0.01460                                    | 6.3750                              | $6.8917 \times 10^{-03}$             | $2.4379 \times 10^{-03}$                |

De acuerdo al Cuadro 9, las diferencias de masa a través del tiempo  $\left( \frac{dm}{dt} \right)$  tuvieron valores similares, ya que tuvieron el mismo peso al igual que el tiempo de la evaluación. Sin embargo, la película M1-0.8 presentó mayor pendiente de la recta obtenida. En el caso del índice de transferencia al vapor de agua (WVT), obtuvieron valores muy semejantes, debido a la misma área de aplicación de cada ensayo, de tal manera que en la película M1-0.8 obtuvo un mayor índice de transferencia al vapor de agua. En los resultados de permeancia ( $Pe$ ), los valores continúan de manera proporcional, ya que se multiplicó a una determinada presión a la misma temperatura del ensayo. Por lo tanto, la película M3-1.5 obtuvo una baja permeancia. Por último, en la permeabilidad del vapor de agua ( $PVA$ ), los resultados varían debido al grosor de cada película comestible, recordando que la película M3-1.5 obtuvo mayor espesor de las películas comestibles. Sin embargo, los resultados de permeancia multiplicado por el grosor de la película comestible, podemos ver que la película M3-1.5 obtuvo una mayor permeabilidad al vapor de

agua con un valor de  $2.4379 \times 10^{-03} \frac{gmm}{hm^2Pa}$ , por otra parte, la película M1-0.8 mostró una baja permeabilidad al vapor de agua con un valor de  $1.3496 \times 10^{-03} \frac{gmm}{hm^2Pa}$ .

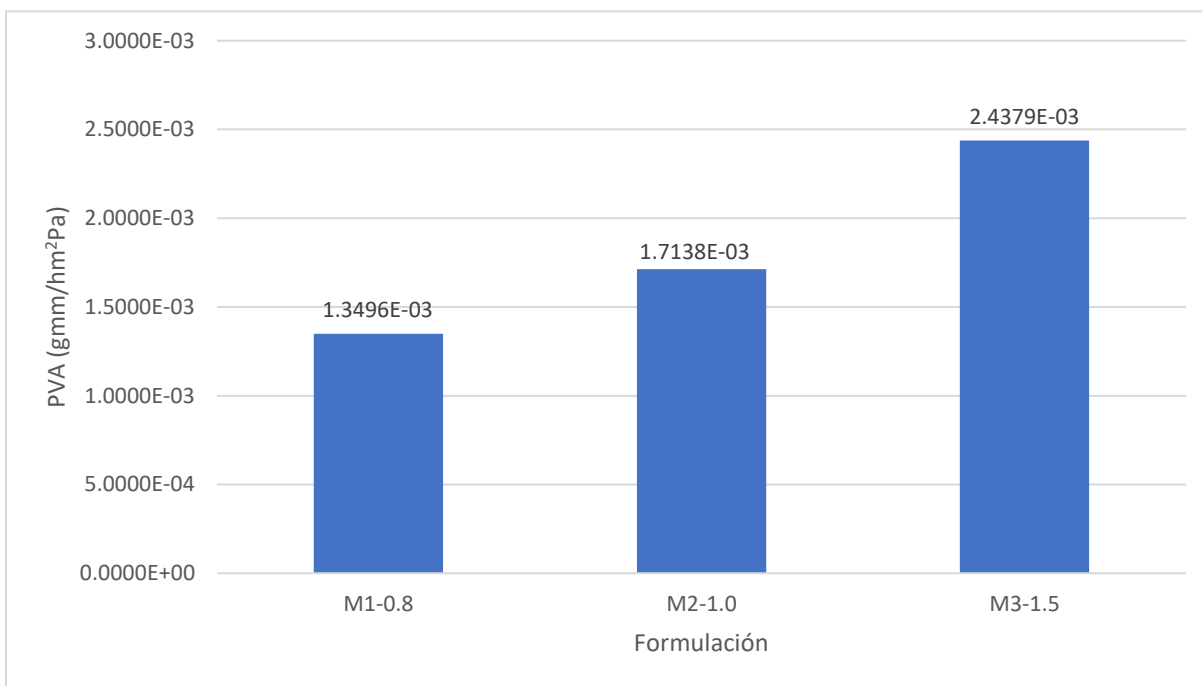
Uno de los factores más importantes que afecta la permeabilidad al vapor de agua, es el uso de plastificantes, ya que cuanto mayor contenido de plastificante, mayor será la PVA, esto debido a que su presencia disminuye las fuerzas intermoleculares en las cadenas del polímero, dando una mayor movilidad molecular, aumentando su permeabilidad al agua (Villada & Joaqui, 2013).



**Figura 13.** Prueba de permeabilidad de vapor de agua en las películas comestibles.

Se reportó que el primer ensayo de la prueba de permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles (Figura 13) se descartó, debido a una anomalía que se presentó en las condiciones climáticas de la cámara de prueba, durante el segundo día, el clima del estado de Oaxaca de Juárez tuvo una temperatura promedio de 21°C y la cámara de prueba reportó una humedad relativa promedio de 36% HR y una temperatura promedio de 19.1 °C, pero en el tercer día, el ambiente presentó una temperatura promedio de 28 °C y la cámara de prueba reportó una humedad relativa promedio de 34% HR y una temperatura promedio de 20.5 °C. Al aumentar la

temperatura ambiente, disminuyó el peso de la caja Petri y la humedad relativa de la cámara de prueba, por lo cual comenzó a aumentar el peso de la caja Petri. Sin embargo, se consideraron los dos últimos ensayos para los resultados de permeabilidad al vapor de agua.



**Gráfica 14.** Permeabilidad al vapor de agua de películas comestibles a base de mucílago de nopal con diferentes concentraciones de HEC.

De la Gráfica 14, podemos observar el aumento de la permeabilidad del vapor de agua a partir de la película comestible M1-0.8 con un valor de  $1.3496 \times 10^{-03} \frac{\text{gmm}}{\text{hm}^2\text{Pa}}$  hasta llegar a la última película comestible M3-1.5 con un promedio de  $2.4379 \times 10^{-03} \frac{\text{gmm}}{\text{hm}^2\text{Pa}}$ , lo cual significa que una alta concentración de HEC proporciona una cierta ventaja a las películas comestibles, eso es debido por un buen espesor de las películas comestibles.

Se observa que la permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles aumenta cuando el porcentaje de hidroxietilcelulosa es mayor, es decir, cómo se puede ver que la película comestible obtenida a partir de la formulación M1-0.8 (0.8% m/v de hidroxietilcelulosa) y de la formulación M2-1.0 (1.0% m/v de hidroxietilcelulosa) presentaron menores valores de

permeabilidad al vapor de agua con espesores menores de 0.19125 mm y 0.25750 mm, respectivamente; por otra parte, la formulación M3-1.5 compuesta por 1.5% m/v de hidroxietilcelulosa presentó películas comestibles más permeables al vapor de agua con un espesor mayor de 0.35375 mm.

La permeabilidad al vapor de agua es una propiedad importante de películas comestibles, debido a que la mayoría de las películas a base de biopolímeros son propensas a plastificarse con agua, lo cual modifica las características de la matriz polimérica (Deng *et al.*, 2009).

De acuerdo con Solis (2016), los valores de permeabilidad al vapor de agua de las películas sin glicerol fueron los siguientes: HPMC 0.5%,  $2.43 \times 10^{-11} \frac{g\ m}{s\ Pa\ m^2}$ ; HPMC 1.0%,  $2.90 \times 10^{-11} \frac{g\ m}{s\ Pa\ m^2}$ ; HPMC 1.5,  $3.78 \times 10^{-11} \frac{g\ m}{s\ Pa\ m^2}$ ; y HPMC 2.0%,  $5.13 \times 10^{-11} \frac{g\ m}{s\ Pa\ m^2}$ ; presentaron pocas diferencias en PVA al incrementar la concentración de HPMC, los valores están en el mismo orden de magnitud y no existió diferencia significativa entre ellos.

Se ha reportado que, en las películas más hidrofílicas, la PVA aumenta por la plastificación de la red polimérica debido a la sorción de agua que da lugar a una estructura menos densa, con mayor movilidad molecular, permitiendo una mayor permeación y difusión de agua a través de ella (Morilion *et al.*, 2002).

Por lo tanto, las películas comestibles que contienen mayor porcentaje de hidroxietilcelulosa presentan una mayor permeabilidad al vapor de agua, ya que depende proporcionalmente al incremento en el grosor de la película comestible.

### **3.2.2 Propiedades superficiales**

#### **3.2.2.1 Adherencia**

Las películas comestibles M1-0.8, M2-1.0 y M3-1.5 presentaron una excelente adherencia (Figura 15). Las láminas a base de hojas de elote con un espesor de 0.039 mm consideradas

como láminas delgadas, se comprimieron más que las de un espesor de 0.95 mm como láminas gruesas, debido al secado de la prueba a una temperatura de 50° C.



**Figura 15.** Prueba de adherencia de las películas comestibles.



**Figura 16.** Adherencia de películas a base de mucílago de nopal en láminas de hojas de elote.

En la Figura 16, podemos ver que una de las películas comestibles unida en lámina de hoja de elote, se adhirió completamente y conservó el mismo tamaño de la capa, ya que presentó una textura rugosa y color transparente, por lo que sería una buena protección para la lámina y

considerarlo en grandes áreas de aplicación. Eso es debido, a una buena aplicación de agua sobre la lámina.



**Figura 17.** Falta de adherencia de películas a base de mucílago de nopal en láminas de hojas de elote.

Se pudo observar que cuando no presentan adhesión, la película comestible se despegaba fácilmente de la lámina a base de hojas de elote dando una textura lisa y color transparente, debido a que no se roció agua completamente en la superficie de la lámina (Figura 17).

La adhesividad de la película sobre la superficie del alimento depende principalmente de su naturaleza y del número de interacciones o enlaces entre el recubrimiento y el soporte. Por lo tanto, el uso de sustancias tensoactivas tales como los emulsificantes, hacen posible la adherencia de una película hidrofóbica sobre un producto alimenticio muy hidrofílico (Debeaufort *et al.*, 1998). Por lo que se utilizó mucílago de nopal como emulsificante para la aplicación de la adherencia de las películas comestibles.

Las películas elaboradas con gelatina de pescado tienden a tener una mayor adherencia que las elaboradas a partir de proteína aislada de suero lácteo, lo que implica mayores dificultades a la hora de desprender los films de las placas Petri. A pesar de estas dificultades, la mayor adherencia de estas películas resulta una característica interesante a la hora de producir

recubrimientos comestibles, ya que supone una adhesión de mayor intensidad entre el recubrimiento y el alimento (García , 2017). Sin embargo, se podría mejorar la adherencia de las películas comestibles a base de mucílago de nopal utilizando gelatina de pescado.

### 3.2.3 Propiedades térmicas

#### 3.2.3.1 Resistencia térmica

Considerando los cálculos efectuados de la resistencia térmica de las películas comestibles (ver Anexo F), el Cuadro 10 muestra los resultados de resistencia térmica de cada película comestible.

**Cuadro 10.** Resistencia térmica de las películas comestibles.

| Temperatura del agua<br>destilada | RT(%)   |         |         |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|                                   | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
| 50 °C                             | 29.1653 | 36.7033 | 43.5723 |
| 60 °C                             | 28.5049 | 33.6764 | 38.3392 |
| 70 °C                             | 27.4733 | 32.1832 | 37.2116 |
| 80 °C                             | 25.5367 | 26.9986 | 36.0505 |
| 90 °C                             | 17.7299 | 21.7361 | 31.7801 |
| 95 °C                             | 15.2910 | 19.3701 | 24.0659 |

La película M1-0.8 presentó una menor resistencia a una temperatura de 50 °C con un valor de 29.1653% al igual que la película M2-1.0 obtuvo un 36.7033% de resistencia térmica mientras que la película M3-1.5 presentó una mayor resistencia térmica a la misma temperatura con 43.5723%. En el caso de la temperatura de 60 °C, la película M1-0.8 disminuyó el valor de la resistencia térmica con un valor de 28.5049 %, de igual manera, las películas restantes tuvieron el mismo efecto dando 32.1832% en la película M2-1.0 y 38.3392% de resistencia térmica en la película M3-1.5. Se observa que, al aumentar la temperatura del agua, las películas comestibles empiezan a reducir su tamaño por lo que se consideró un periodo de 10 minutos para poder evaluarlo hasta una temperatura de 95° C. Sin embargo, en la temperatura de ebullición del agua (95 °C), la película M1-0.8 presentó un valor de 15.2910 %, la película M2-1.0 obtuvo un

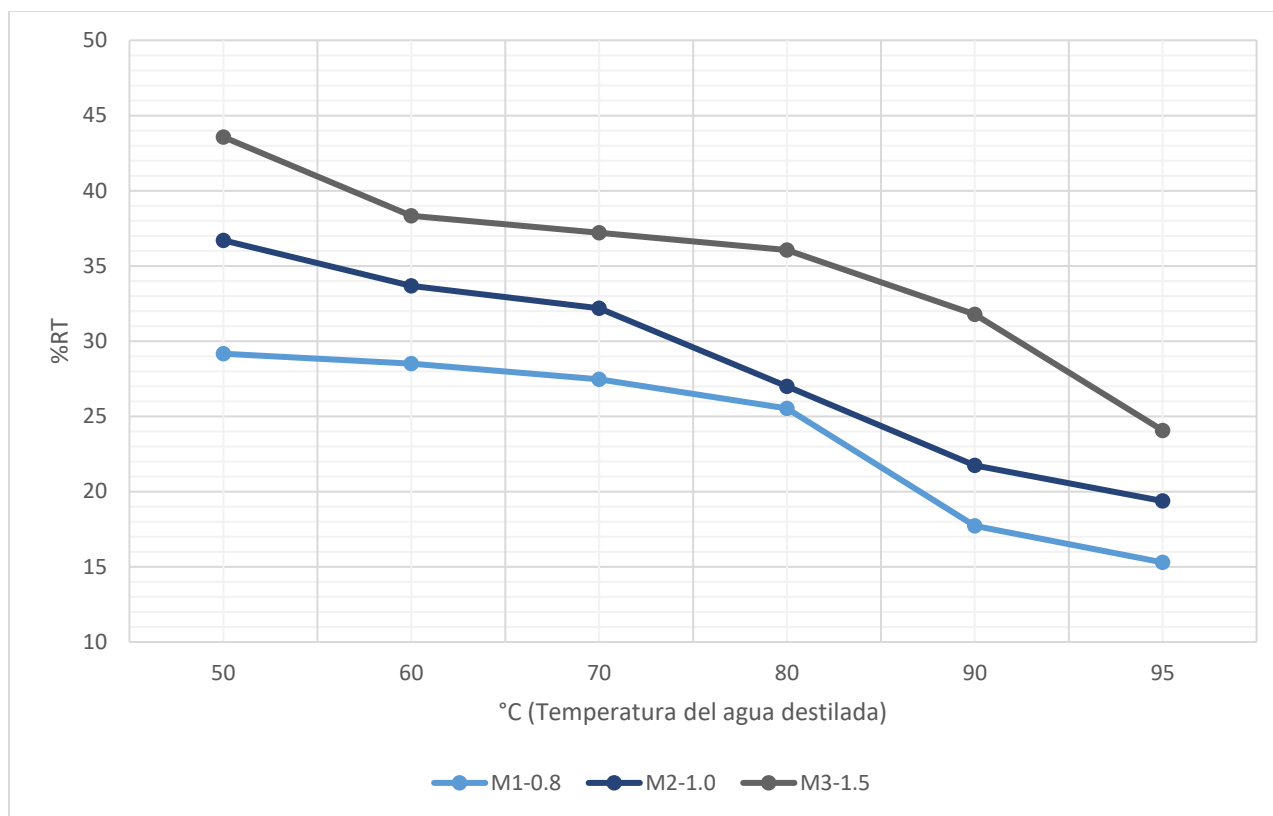
19.3701% de resistencia térmica y en la película M3-1.5 obtuvo un valor de 24.0659 %, esos últimos valores nos indica que no son muy resistentes a alta temperatura.



**Figura 18.** Prueba de resistencia térmica de las películas comestibles.

Cuando la temperatura del agua aumenta, la resistencia térmica de las películas comestibles disminuye. La concentración de hidroxietilcelulosa en cada película jugó un papel importante. En la Figura 18, se observa que, a 50°C, la película M1-0.8, M2-1.0 y M3-1.5 obtuvieron mayores valores de mayor resistencia térmica al agua con 29.1653%, 36.7033%, 43.5723%, respectivamente. A la temperatura de 95 °C, las formulaciones M1-0.8, M2-1.0 y M3-1.5 presentaron valores menores de resistencia térmica con 15.2910%, 19.3701%, 24.0659%, respectivamente. Por lo tanto, las películas comestibles evaluadas son más resistentes a temperaturas por debajo de los 50 °C.

. En la Gráfica 19, se observa gráficamente el comportamiento de la resistencia térmica de cada película comestible. Se muestra de manera general que la resistencia térmica va disminuyendo conforme la temperatura del agua va aumentando.



**Gráfica 19.** Resistencia térmica de películas comestibles a base de mucílago de nopal con diferentes concentraciones de HEC.

De acuerdo a los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) de las películas comestibles a base de extractos pécticos y aceite esencial de limón mexicano, por parte de Sánchez *et al.* (2015). La resistencia térmica de la película comestible a una temperatura de 51.73°C, 100 a 163.92°C, 216.66°C, 242.66°C, 329.45°C, 400 a 500°C obtuvieron los siguientes valores: 90.007%, 85.72%, 86.55%, 88.3%, 80.18%, respectivamente. Comparando con la mayor resistencia de la película comestible que fue la M3-1.5 con un 43.5723 % a una temperatura de 50°C. Sin embargo, se observa que las películas comestibles hechas por Sánchez *et al.* (2015) tienen buenas propiedades térmicas.

Por otro lado, los resultados del TGA de las películas multicapa de almidón de maíz y carboximetilcelulosa reforzadas con nanofibras de algodón por parte de Valle (2018), la resistencia térmica de MC-0, MC-1, MC-3, MC-5 y MC-8 a una temperatura 109.69 °C, 115.68°C,

86.39°C, 103.19°C, 86.77°C, respectivamente, obtuvieron los siguientes: 90.99%, 93.34%, 90.99%, 92.91%, 91.16%, respectivamente. Por lo mismo se puede decir que las películas comestibles elaboradas por Valle (2018) tienen excelentes propiedades térmicas.

De las tres formulaciones de películas evaluadas, la M3-1.5 obtuvo una mayor resistencia térmica (43.5723%), seguida de la M2-1.0 (36.7033%) y M1-0.8 (29.1653%). Nuevamente se observa que el porcentaje de HEC añadido influyó en la resistencia de la película a la temperatura. Sin embargo, ninguna de las mezclas utilizadas logró tener una resistencia alta mayor al 90%.

## CONCLUSIONES

Las películas comestibles a base de mucílago de nopal combinando con hidroxietilcelulosa, glicerol y polietilenglicol mostraron buena apariencia con la facilidad de desmoldeo y sin burbujas.

Los espesores de las películas comestibles están en función de la concentración de la hidroxietilcelulosa, ya que, a mayor concentración, el grosor aumenta. Los espesores de las películas comestibles evaluadas M1-0.8, M2-1.0, M3-1.5 obtuvieron 0.19125 mm, 0.25750 mm, 0.35375 mm, respectivamente.

De acuerdo con los resultados de la evaluación de la materia soluble en agua, las películas comestibles que contienen mayor porcentaje de hidroxietilcelulosa presentan un menor porcentaje de solubilidad en agua. La película M1-0.8 es más soluble con un contenido de 76.8498 %, mientras que la película M2-1.0 es menos soluble con 69.4169 % al igual que la película M3-1.5 con un 66.9957 %.

La prueba de permeabilidad al vapor de agua muestra que las formulaciones M1-0.8 y M2-1.0 presentaron menores valores de permeabilidad al vapor de agua con  $1.3496 \times 10^{-03} \frac{gmm}{hm^2Pa}$  y  $1.7138 \times 10^{-03} \frac{gmm}{hm^2Pa}$ , respectivamente; por otra parte, la formulación con mayor valor de permeabilidad al vapor de agua fue la M3-1.5 con un valor de  $2.4379 \times 10^{-03} \frac{gmm}{hm^2Pa}$ , en base a lo anterior, se observa que el uso de hidroxietilcelulosa tiene un efecto significativo sobre la cantidad de vapor de agua que atraviesa la superficie de la película comestible, es decir, a mayor porcentaje de hidroxietilcelulosa, mayor permeabilidad al vapor de agua, ya que depende proporcionalmente al incremento en el grosor de la película comestible.

La adherencia de las películas comestibles M1-0.8, M2-1.0 y M3-1.0 presentaron buenos resultados sin importar el espesor de las láminas a base de hojas de elote.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la resistencia térmica disminuye, en función de la concentración de la HEC, a medida que la temperatura del agua aumenta. Por lo tanto, las películas comestibles que contienen mayor porcentaje de hidroxietilcelulosa presentan una alta resistencia térmica y son más resistentes a una temperatura de 50°C, en cambio, son menos resistentes a la temperatura de ebullición del agua. La película M3-1.5 obtuvo una mayor resistencia térmica (43.5723%), seguida de la M2-1.0 (36.7033%) y M1-0.8 (29.1653%) a una temperatura de 50°C. Sin embargo, ninguna de las mezclas utilizadas logró tener una resistencia alta mayor al 90%.

La película comestible M3-1.5 resultó una buena formulación, pero no logró una alta resistencia térmica como se esperaba, aunque obtuvo mayor permeabilidad al vapor de agua y menor solubilidad obteniendo una buena adherencia al aplicarse como forma de protección sobre la lámina a base de hojas de elote.

## RECOMENDACIONES

- 1) Una técnica sugerida para mejorar el rendimiento del mucílago de nopal, se podría utilizar nopal de la especie *Opuntia Tomentosa*, ya que se han hecho estudios considerándolo como una mejor opción con mayores rendimientos del mucílago de nopal.
- 2) Se propone adicionar otro biopolímero a la formulación como el almidón para mejorar las propiedades de las películas comestibles a base de mucílago de nopal. También se podría utilizar hidroxipropilcelulosa (HPC) porque es un biopolímero realmente termoplástico.
- 3) Realizar pruebas de resistencia térmica considerando una temperatura de 50 °C hasta la temperatura de ebullición aumentando el tiempo de prueba con el fin de obtener películas comestibles que resistan a altas temperaturas.
- 4) Se recomienda tomar en cuenta las condiciones climáticas del lugar de trabajo para llevar a cabo la prueba de permeabilidad al vapor de agua de manera convencional.
- 5) Se propone determinar las propiedades mecánicas realizando pruebas de resistencia a la tensión, elongación y rompimiento de las películas comestibles a base de mucílago de nopal.
- 6) Se recomienda almacenar las películas comestibles a base de mucílago de nopal adheridas sobre láminas a base de hojas de elote en un desecador, ya que podrían afectar sus propiedades físicas.
- 7) Se propone determinar las propiedades de barrera a gases para controlar el intercambio de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y vapor de agua de las películas comestibles a base de mucílago de nopal.

## FUENTES DE INFORMACIÓN

- Abraján-Villaseñor, M. (2008). Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].
- Abugoch, L., Tapia, C., Villamán, M., Yazdani-Pedram, M., & Díaz-Dosque, M. (2011). Characterization of quinoa protein chitosan blend edible films. *Food Hydrocolloids*, 879-886.
- acofarma. (s. f.). HIDROXIETILCELULOSA. *FICHAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA*. Obtenido de <https://formulasmagistrales.acofarma.com/idb/descarga/3/f305ee3d36f925b5.pdf>
- Adinugraha, M., & Marseno, D. (2005). Synthesis and characterization of sodium carboxymethylcellulose from cavendish banana pseudo stem (*Musa cavendishii* LAMBERT). *Carbohydrate Polymers*, 164-169.
- Alfaro-Aranda, J. (2009). Materiales biodegradables para envases alimentarios. [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2010/enero/0652855/Index.html>
- Alvarado-González, J., Dominguez-Fernández, R., Welte-Chanes, J., Calderón, G., Garibay-Feblés, V., & Chanona-Pérez, J. (2011). Structural and physicochemical characterization of edible films elaborated with Aloe vera (*barbadensis* Miller) and gellan gum. *Memorias de VI International Symposium on Towards a Sustainable Food Chain Food Process. Bioprocessing and Food Quality Management*, 18-20.
- Alzate, P. (2017). Caracterización fisicoquímica de películas comestibles elaboradas con almidón de mandioca nativo o modificado e hidroxipropil metilcelulosa (HPMC) y actividad antimicrobiana de agentes preservadores retenidos en ellas. [tesis de maestría,

Universidad de Buenos Aires]. Obtenido de  
[https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis\\_n6429\\_AlzateCalderon](https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6429_AlzateCalderon)

Arisz, P., Lusvardi, K., & Nguyen, T. (2017). *España Patente nº 2 309 960 T5*. Obtenido de  
[https://patentimages.storage.googleapis.com/40/5c/7d/68d830cb2b90f2/ES2309960T5.p  
df](https://patentimages.storage.googleapis.com/40/5c/7d/68d830cb2b90f2/ES2309960T5.pdf)

Arizmendi-Cotero, D. (2004). *Optimización de dos compuestos plastificantes (glicerol y polietilenglicol) en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir del mucílago de nopal de la especie Opuntia tomentosa Salm-Dyck*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Arvanitoyannis, I., Kolokuris, I., Nakayama, A., & Aiba, S. (1997). Preparation and study of novel biodegradable blends based on gelatinized starch and 1, 4-trans-polyisoprene (gutta percha) for food packaging or biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 291-302. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(97\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(97)00085-4)

Ávila-Sosa, R., Palou, E., Munguía, M., Nevaréz-Moorillón, G., Cruz, A., & López-Malo, A. (2012). Antifungal activity by vapor contact of essential oils added to amaranth, chitosan, or starch edible films. *International Journal of Food Microbiology*, 66-72. Obtenido de <https://doi.10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.017>

Baqué. (08 de Enero de 2019). *Diferencia entre biodegradable y compostable*. Obtenido de <https://www.baque.com/es/blog/diferencia-entre-biodegradable-y-compostable/>

Bertuzzi, M., Castro Vidaurre, E., Armada, M., & Gottifredi, J. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 972–978.

Bósquez-Molina, E., & Vernon-Carter, E. (2005). Efecto de plastificantes y calcio en la permeabilidad al vapor de agua de películas a base de goma de mezquite y cera de

- candelilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 157-162. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62040203>
- Bovey, F., & Winslow, E. (1981). *Macromolecules, an Introduction to Polymer science*. Academic Press.
- Bravo, H. (1978). *Las cactáceas de México*. México: UNAM.
- Brownsey, G., & Redout, M. (1985). Rheological characterization of microcrystalline cellulose dispersions: Avicel RC 591. *J. Food Technology*, 237.
- Cagri, A., Ustunol, Z., & Ryser, E. (2004). *Antimicrobial edible films and coatings*. Obtenido de <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.4.833>
- Carballo, E., & Martínez, E. (2010). Determinación de la permeabilidad al vapor de agua por el metodo ASTM E96/E 96M-05 en películas de quitosano. [tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador]. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2497/>
- Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 152–157.
- Carmona Gallego, J., Cordobés, F., Guerrero Conejo, A., Martínez, I., & Partal López, P. (2007). Influencia del pH y de la fuerza iónica sobre la gelificación térmica de proteínas de la yema de huevo. *Grasas y aceites*, 289-296. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/54857>
- Cedrón, J., & Landa, V. (2019). Química General: Polímeros. Obtenido de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>
- Chandra, S., Eklund, L., & Villareal, R. (1998). Use of cactus in mortars and concrete . *Cement and Concrete Research*, 41-51.

- Coffey, D., Bell, A., & Henderson, A. (1995). Cellulose and cellulose derivatives. *Food Polysaccharides and their applications*, 123-153. NY-USA: Stephen A. M.
- Connor, N. (08 de Enero de 2020). ¿Qué es la resistencia térmica? Resistividad térmica: definición. Obtenido de <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-resistencia-termica-resistividad-termica-definicion/>
- Cosmética Dr. Alía. (05 de Septiembre de 2017). *Características y formulación del gel de hidroxietilcelulosa*. Obtenido de <https://cosmeticadoctoralia.com/gel-de-hidroxietilcelulosa/>
- Craig, D. (1986). Grafting reactions of (hydroxyethyl)-cellulose during emulsion polymerization of vinyl monomers. *Advances in Chemistry Series*.
- CTS ESPAÑA. (s.f.). POLIETILENGLICOL (PEG) 4000. Obtenido de <https://shop-espana.ctseurope.com/177-polietilenglicol-peg-4000>
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo, J., & Voilley, A. (1998). Edible films and coatings: Tomorrow's packagings: A review. *Critical Reviews in Food Science*, 299-313.
- delMaiz.info. (12 de Junio de 2021). *Características del maíz que lo hacen una planta versátil*. Obtenido de <http://delmaiz.info/caracteristicas/>
- Del-Valle , V., Hernández-Muñoz, P., Guarda , V., & Galotto , M. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chem*, 751-756.
- Deng, Y., Zhu, L., Luo, W., Xiao, C., Song, X., & Chen, J. (2009). Changes in physical properties of chitosan films at subzero temperatures. *Food Science*, 487-497.
- Eden . (s.f.). Obtenido de <https://www.aguaeden.es/blog/que-son-los-vasos-biodegradables>

Emerging food R&D report. (2003). Develop biopolymers for packaging applications. Obtenido de [http://goliath.ecnext.com/coms2/gi\\_0199-889964/Develop-biopolymers-for-packagingapplications](http://goliath.ecnext.com/coms2/gi_0199-889964/Develop-biopolymers-for-packagingapplications).

ERENOVABLE.COM. (26 de Enero de 2018). *Biodegradables- Qué es , ejemplos y ventajas de materiales biodegradables*. Obtenido de <https://erenovable.com/biodegradable-quees/>

Escobar, D., Sala, A., Silvera, C., Harispe, R., & Márquez, R. (2009). Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador. *Revista del Laboratorio tecnológico del Uruguay*, 33-36.

Espinel, V., Flores , S., & Gerschenson, L. (2014). Biopolymeric antimicrobial films: Study of the influence of hydroxypropyl methylcellulose, tapioca starch and glycerol contents on physical properties. *Materials Science and Engineering*, 108–117.

Espino-Díaz, M., De Jesús Ornelas-Paz, J., Martínez-Téllez, M., Santillán, C., Barbosa-Cánovas, G., Zamudio-Flores, P., & Olivas, G. (2010). Development and characterization of edible films based on mucilage of *Opuntia ficus-Indica* (l.). *Journal of Food Science*, E347-E352. Obtenido de DOI: 10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x

Espinosa, S. (2002). Estudio de algunas características físicas de hidrocoloides provenientes de semilla de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) y de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. [tesis de maestría,Universidad de Chile].

Falguera , V., Quintero, J., Jiménez, A., Muñoz, J., & Ibarza , A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. *Trends in Food Science & Technology*, 292 – 303.

García , A. (2017). COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE PELÍCULAS COMESTIBLES BASADAS EN PROTEÍNA AISLADA DE SUERO LÁCTEO O GELATINA DE PESCADO CON EXTRACTOS DE HINOJO MARINO INCORPORADOS.

García Calopiña , L., García Coronado, A., Olaya Castillo, P., Rosas Namuche, G., & Vignolo Urbina, D. (2019). Diseño del proceso productivo de bandejas biodegradables a partir de fécula de maíz.

Garti, N. (1999). Hydrocolloids as emulsifying agents for oil-in-water emulsions. *J. Disper. Sci. Technol*, 327-355.

GBIF. (2021). Especies silvestres de nopales mexicanos. Obtenido de <https://www.gbif.org/es/dataset/d0d734c0-14f5-4f70-b915-5740cce60b07#temporalCoverages>

GBIF. (2021). *Nopalea auberi* (Pfeiff.) Salm-Dyck in GBIF Secretariat. *GBIF Backbone Taxonomy*. Obtenido de <https://www.gbif.org/es/species/3952265>

Gheribi, R., Puchot, L., Verge, P., Jaoued-Grayaa, N., Mezni, M., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2018). Development of Plasticized Edible Films from *Opuntia ficus-indica* Mucilage: A Comparative Study of Various Polyol Plasticizers. *Carbohydrate Polymers*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.085>

Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J.-L. (1993). Water and Glycerol as Plasticizers Affect Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of an Edible Wheat Gluten Film. *Journal of food science*. Obtenido de <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb03246.x>

González-González, L. R. (2011). Desarrollo y evaluación de una película comestible obtenida del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) utilizada para reducir la tasa de respiración de nopal verdura. *INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA MULTIDISCIPLINARIA*, 131-138.

- Goycoolea, F., Cárdenas, A., Hernández, G., Lizardi, J., Álvarez, G., Soto, F., . . . Hernández, J. (2000). Polisacáridos Aislados del Mezquite y otras Plantas del Desierto. *Memorias del II Simposium Internacional sobre la Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre de Zonas Áridas*. 245–260.
- Granados Sánchez, D., & Castañeda Pérez, A. (2000). *El nopal. Historia, Fisiología, Genética e Importancia frutícola*. México: Trillas.
- Group, S. (26 de Septiembre de 2019). *Envases Biodegradables: pros y contras*. Obtenido de <https://www.spg-pack.com/blog/envases-biodegradables-pros-y-contras/>
- Guilbert, S., & Biquet, B. (1995). *Películas y envolturas comestibles*. En *Embalaje de los alimentos de gran consumo*. Ed. Acribia Zaragoza.
- Guo, M., Jin, T., Wang, L., Scullen, O., & Sommers, C. (2014). Antimicrobial films and coatings for inactivation of *Listeria innocua* on ready-to-eat deli turkey meat. *Food control*, 64-70.
- Hellgren, A., Weissenborn, P., & Holmberg, K. (1999). Surfactants in water-borne paints. *Progress in Organic Coatings*, 79–87.
- Hernández Cabrera, K. (2016). *Formulación y Caracterización de Películas Comestibles de Almidón de Papa Nativo y Modificado*. [tesis de maestria, Universidad Veracruzana].
- Hernández Tomas , K. (2013). *BIODEGRADACIÓN DE ENVASES ELABORADOS A BASE DE FÉCULA DE MAÍZ, PAPA, CAÑA DE AZÚCAR, PAPEL Y OXO-BIODEGRADABLES*. [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Obtenido de [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000693542](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000693542)
- Hurter, W. (2001). Nonwood plant fiber uses in papermaking. *Agricultural Residues*.
- Jaworek, A., & Sobczyk, A. (2008). Electrospraying route to nanotechnology: an overview. *Journal of electrostatics*, 197-219. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.10.001>

- Jouki, M., Yazdi, F. T., Mortazavi, S. A., & Koocheki, A. (2013). Physical, barrier and antioxidant properties of a novel plasticized edible film from quince seed mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 500–507.
- Kampf, G. (1986). Characterization of Plastics by Physical Methods. *Hanser publishers*.
- Khazaeia , N., Esmailia, M., Djomehb, Z., Ghasemlouc , M., & Jouki , M. (2014). Characterization of new biodegradable edible film made from basil seed (*Ocimum basilicum* L.) gum. *Carbohydrate Polymers*, 199–206.
- Kobayashi, K., Huang, C., & Lodge, T. (1999). Thermoreversible gelation of a aqueous methylcellulose solutions. *Macromolecules*, 7070-7077.
- Kondo, T. (1993). Preparation of 6-O-alkyl celluloses. *Carbohydrates*, 231.
- Krochta, J., & De Mulder-Johnston, C. (1997). Edible and biodegradable polymer films: challenges and opportunities. *Food Technology*, 61-77.
- Kroschwitz, J. (1990). *Encyclopedia of polymer science and engineering CONCISE*. Estados Unidos.
- Lacroix, M. (2009). Mechanical and Permeability Properties of Edible Films and Coatings for Food and Pharmaceutical Applications Trans. *Edible Films and Coatings for Food Applications*, 347-366.
- León-Martínez, F., Méndez-Lagunas, L., & Rodríguez-Ramírez, J. (2010). Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 864–870.
- Liling, G., Di, Z., Jiachao, X., Xin, G., Xiaoting, F., & Qing, Z. (2016). Effects of ionic crosslinking on physical and mechanical properties of alginate mulching films. *Carbohydrate Polymers*, 259-265.

- Majdoub, H., Roudesli, S., & Deratani, A. (2001). Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. *Polymer International*, 552-560.
- Marchessault, R., & Sundararajan, P. (1983). Cellulose. *THE POLYSACCHARIDES*, Vol 2, 11. NY-USA: Aspinall.
- Márquez-Sánchez, D. (2019). Envase eco sustentable fabricado con hojas de maíz y mucilago de nopal como aditivo. Obtenido de [https://www.ecorfan.org/proceedings/Proceedings\\_Ciencias\\_Agropecuarias\\_y\\_Biotecnologia\\_TI/Proceedings\\_Ciencias\\_Agropecuarias\\_y\\_Biotecnologia\\_TI\\_4.pdf](https://www.ecorfan.org/proceedings/Proceedings_Ciencias_Agropecuarias_y_Biotecnologia_TI/Proceedings_Ciencias_Agropecuarias_y_Biotecnologia_TI_4.pdf)
- McHugh, T. (2000). Protein-Lipid interactions in edible films and coatings. *Nahrung*, 148-151. Obtenido de DOI: 10.1002/1521-3803(20000501)44:3<148::AID-FOOD148>3.0.CO;2-P
- Medina-Torres, L. (2005). Estudio reológico del mucílago de nopal y sus efectos sinérgicos con otros hidrocoloides de uso alimenticio. [tesis doctoral, UNAM].
- Medina-Torres, L., Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Alonso, S. (2003). Mechanical properties of gel formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 143-150.
- Medina-Torres, L., Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Kattain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*, 417-424.
- Mendieta-Taboada, O., Sobral, P., & Carvahlo, R. (2008). Thermomechanical properties of biodegradable films base don blends of gelatin and poly(vinyl alcohol). *Food hidrocolloids*, 1485-1492.

- Mendoza Escamilla, V. (11 de Septiembre de 2012). Residuos del maíz, idea emprendedora. *EXPANSIÓN*. Obtenido de <https://expansion.mx/emprendedores/2012/09/10/una-idea-materia-prima-del-emprendedor>
- Miranda, S., Cárdenas, G., López, D., & Lara-Sagahon, A. (2003). Comportamiento de películas de Quitosán compuesto en un modelo de almacenamiento de aguacate. *Revista de la Sociedad Química de México*, 331-336. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v47n4/v47n4a8.pdf>
- Mohanty, A., Misra, M., Drzal, L., E. Selke, S., R. Harte, B., & Hinrichsen, G. (2005). Natural fibers, biopolymers and biocomposites: An Introduction. *Natural fibers, biopolymers and biocomposites*.
- Monedero, F., Fabra, M., Talens, P., & Chiralt, A. (2009). Effect of oleic acid–beeswax mixtures on mechanical, optical and water barrier properties of soy protein isolate based films. *Journal of Food Engineering*, 509-515.
- Monroy-Villagrana, A., Cano-Sarmiento, C., Alamilla-Beltrán, L., Hernández-Sánchez, H., & Gutiérrez-López, G. (2014). Coupled taguchi-rsm optimization of the conditions to emulsify  $\alpha$ -tocopherol in an Arabic gum-maltodextrin matrix by microfluidization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 679-688. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a3.pdf>
- Morillon, V., Debeaufort, F., Blond, G., Capelle, M., & Voilley, A. (2002). Factors affecting the moisture permeability of lipid-based edible films: a Review. *Crit. Rev. Food Sci Nutr.*, 67-89.
- Muñoz, L., Aguilera, J., Rodriguez-Turienzo, L., Cobos, A., & Díaz, O. (2012). Characterization and microstructure of films made from mucilage of *Salvia hispanica* and whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 511-518.

- Murillo-Martínez, M., Pedroza-Islas, R., Lobato-Calleros, C., Martínez-Ferez, A., & Vernon-Carter, E. (2011). Designing W1/O/W2 double emulsions stabilized by protein-polysaccharide complexes for producing edible films: Rheological, mechanical and water vapour properties. *Food Hydrocolloids*, 577-585.
- Nahringbauer, I. (1995). Dynamic surface tension of aqueous polymer solutions, ethyl(hydroxyethyl)cellulose. *Journal of colloid and interface science*, 318-328.
- NaturePlast. (s.f). *Aplicaciones de los bioplásticos*. Obtenido de <http://natureplast.eu/es/aplicaciones-de-losbioplasticos/>
- Nelson, A. (2001). *High-fiber ingredients*. Minnessota. Estados Unidos de América.: Eagan Press Handbook Series.
- Nobel, P. (2002). Cacti: biology and uses. 290.
- Orozco , A., Díaz , S., Ramírez , V., & Yáñez, F. (2006). *Secado por Aspersión de Mucílago de Nopal*. Mexico.: IPN.
- Orozco, E. (2017). *Elaboración y caracterización de películas de mucílago de nopal-pectina: efecto de la concentración del mucílago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas*. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/67766>
- Ozdemir , M., & Floros , J. (2008). Optimization of edible whey protein films containing preservatives for water vapor permeability, water solubility and sensory characteristics. 215–224.
- Paredes López, O., Guevara Lara , F., & Bello Pérez, L. (2006). Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. *Colección la Ciencia para todos*, 104-113.
- Park, H., Chinnan, M., & Shewfelt, R. (1994). Edible coating effects on storage life and quality of tomatoes. *Journal of Food Science*, 568-570.

Pérez, B., & Báez, R. (2003). Utilización de ceras comestibles en la conservación de frutas. *Alimentaria*.

Prado-Martínez, M., Anzaldo-Hernández, J., Becerra-Aguilar, B., Palacios-Juárez, H., Vargas-Radillo, J., & Rentería-Urquiza, M. (19 de Enero de 2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712012000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000300004)

Prakash Marana , J., Sivakumarb, V., Sridharc, R., & Thirugnanasambandhamd , K. (2013). Development of model for barrier and optical properties of tapioca starch based edible films. *Carbohydrate Polymers*, 1335–1347.

Rachtanapun, P., Pankan, D., & Srisawat, D. (2012). Edible Films of Blended Cassava Starch and Rice Flour with Sorbital and Their Mechanical Properties. *Journal of Agricultural Science and Technology Science*, 3218-3226.

Ramos, O., Fernandes, J., Silva, S., Pintado, M., & Malcata, X. (2012). Edible Films and Coatings from Whey Proteins: A Review on Formulation, and on Mechanical and Bioactive Properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 533-552. Obtenido de doi: 10.1080/10408398.2010.500528

Ramos-García, M., Bautista-Baños, S., Barrera-Necha, L., Bósquez-Molina, E., Alia-Tejacal, I., & Estrada-Carrillo, M. (2010). Compuestos antimicrobianos adicionados en recubrimientos comestibles para uso en productos hortofrutícolas. *Revista mexicana de fitopatología*, 44-57. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v28n1/v28n1a5.pdf>

REYMA. (2019). Vasos biodegradables. Obtenido de <https://reyma.com.mx/vasos-biodegradables/>

Ríos, R., & Quintana, M. (2004). Manejo general del cultivo del nopal. Manual del participante. *Colegio de Posgraduados-Montecillos*, 81.

Roblejo, L. (2009). Evaluación de la aplicación de coberturas de quitosano en la conservación de tomates. [tesis de licenciatura, Universidad de la Habana].

Rodríguez, G. (2010). Efecto de la incorporación de mucílago de nopal sobre las propiedades sensoriales y texturales de una pasta a base de huitlacoche "Ustilago maydis". [tesis de licenciatura, UMSNH].

Rubio, E. (2009). Estudio comparativo de materiales biocompatibles sintetizados a partir de gomas vegetales, goma biosintética e hidroxietilcelulosa. [tesis doctoral, Instituto Tecnológico de Madero]. Obtenido de <http://200.188.131.162:8080/jspui/bitstream/123456789/153/1/T%C3%A9sis%20DCIQ.pdf>

Ruiz, H., & Guerrero, B. (2009). Aplicación de las películas comestibles a base de quitosano y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananasa*) en refrigeración. [tesis de maestría, Universidad de las Américas Puebla].

Rungsinee Sothornvit, J. (2005). Plasticizers in edible films and coatings. *Innovations in Food Packaging*, 403 – 428.

Sáenz, C., & Sepulveda, E. (1993). Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Alimentos*, 29-32.

Sáenz, H. (2004). Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. *El nopal, tópicos de actualidad.*, 222.

Sáenz, H. (2006). *Opuntia* spp. Bioactive compounds in foods: a plus for health. *Proceedings of fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal*, 231-225.

- Sáenz, H. C., Berger, H., Corrales, G. J., Galletti, L., García, D. C., Higuera, I., . . . Varnero, M. T. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Servicio de Tecnologías de Ingeniería Agrícola y Alimentaria (AGST) con la colaboración de la Red Internacional de Cooperación Técnica del Nopal (FAOACTUSNET). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.*, 168.
- Sáenz, H., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). Opuntia spp. mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environment*, 275–290.
- Sánchez Aldana, D., Contreras-Esquivel, J., Nevárez-Moorillón, G., & Aguilar, C. (2015). Characterization of edible films from pectic extracts and essential oil from Mexican lime. *CyTA - Journal of Food*, 17-25.
- Sarkar, N., & Walker, L. (1995). Hydration-deshydration properties of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, 177-185.
- Schwartz, M., & Baumstark, R. (2001). *Waterbased acrylates for decorative coatings*. Hannover: Vicentz.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp. *Journal of Arid Environments*, 534-545.
- Sharma, S., & Rao, T. (2015). Xanthan gum based edible coating enriched with cinnamic acid prevents browning and extends the shelf-life of fresh-cut pears. *LWT-Food Science and Technology*, 791-800. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.050>
- Soazo, M., Rubiolo, A., & Verdini, R. (2011). Effect of drying temperature and beeswax content on physical properties of whey protein emulsion films. *Food Hydrocolloids*, 1251-1255.
- Solano-Doblado, L., Alamilla-Beltrán, L., & Jiménez-Martínez, C. (2018). Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada en Ciencias*

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>

- Solis, S. (2016). Elaboración y caracterización de películas comestibles elaboradas con hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC). [tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/65172>
- Soliva, R., & Martín, O. (2001). Envasado de alimentos mediante recubrimientos comestibles. *Alimentaria*.
- Sudzuki, F. (1999). Anatomía y morfología. Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio. 132.
- Suriñach, S., Baro, M., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera-Mora, M. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales. *Sociedad española de cerámicas y vidrios*, 11-17.
- tesa. (15 de Septiembre de 2016). tesa. Obtenido de <https://www.tesa.com/es-es/wikitapia/cuanta-miel-necesitas-para-colgar-una-foto.html>
- Trachtenberg, S., & Mayer, A. (1982). Biophysical Properties of Opuntia ficus-indica mucilage. *Phytochemistry*.
- Trachtenberg, S., & Meyer, A. (1982). Mucilage cells, calcium oxalate crystals and soluble calcium in Opuntia ficus indica. *Annals of Botany*, 549-557.
- Trejo, V., Aragón, N., & Miranda, P. (2001). Estimación de la permeabilidad al vapor de agua en películas a base de quitosán. *Revista de la Sociedad Química de México*, 01-05. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v45n1/v45n1a1.pdf>
- Turhan, K., & Şahbaz, F. (2004). Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose-based edible films. *Journal of Food Engineering*, 459-466.

UDELAR. (2005). Estructura y Química de la madera. *Department of forest products technology*.

Valle Marquina, M. A. (2018). Elaboración y caracterización de películas multicapa de almidón de maíz y carboximetilcelulosa reforzadas con nanofibras de algodón. [tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional].

Vargas Rodríguez, L., Gamiño Arroyo, Z., Fuentes Ramírez, R., & Contreras López, D. (Mayo de 2018). Mucilago de nopal y su aplicación en la obtención de biopolímeros. *NATURALEZA Y TECNOLOGIA*, 24-35. Obtenido de <http://www.naturalezaytecnologia.com/index.php/nyt/article/view/276/pdf4>

Villada, H., & Joaqui, D. (2013). Propiedades ópticas y permeabilidad de vapor de agua en películas producidas a partir de almidón. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 59-68.

Villada, H., Acosta, H., & Velasco, R. (25 de Julio de 2007). BIOPOLÍMEROS NATURALES USADOS EN EMPAQUES BIODEGRADABLES. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/312935727\\_Biopolicimeros\\_naturales\\_usados\\_en\\_empaques\\_biodegradables](https://www.researchgate.net/publication/312935727_Biopolicimeros_naturales_usados_en_empaques_biodegradables)

Warson, H., & Finch, C. (2001). *Applications of synthetic resin lattices*. Chichester: Wiley.

Weber, C. (2000). Biobases packaging materials for the food industry. *Food Biopack Project* . Obtenido de <http://www.mli.kvi.dk/foodchem/special/biopack>

Yadollahi, M., Namazi, H., & Barkhordari, S. (2014). Preparation and properties of carboxymethyl cellulose/layered double hydroxide bionanocomposite films. *Carbohydrate polymers*, 83-90.

Zavala, E. (2012). Optimización del proceso de extracción del mucílago de cinco especies de Opuntia (L.) Miller de Michoacán. [tesis de maestría, Universidad Michoacana]. Obtenido de [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/1996](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1996)

## ANEXOS

### A. Nomenclatura

**Cuadro A1. Nomenclatura**

| Símbolo         | Significado                                                                            | Unidad de medida       |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $A$             | Área de la película expuesta                                                           | $[m^2]$                |
| CMC             | Carboximetilcelulosa                                                                   | $[-]$                  |
| COC             | Cocido                                                                                 | $[-]$                  |
| DEC             | Decolorado                                                                             | $[-]$                  |
| $\frac{dm}{dt}$ | Diferencia de masa a través del tiempo                                                 | $[\frac{g}{h}]$        |
| ENT             | Entero                                                                                 | $[-]$                  |
| ESC             | Escaldado                                                                              | $[-]$                  |
| $A_n$           | Ganancia de peso en la caja Petri en un periodo determinado                            | $[Fracción]$           |
| G               | Glicerol                                                                               | $[-]$                  |
| $Gr$            | Grosor                                                                                 | $[mm]$                 |
| HPMC            | Hidroxipropilmetilcelulosa                                                             | $[-]$                  |
| $R_1$           | Humedad relativa de la cámara                                                          | $[Fracción]$           |
| $R_2$           | Humedad relativa interna de la caja Petri                                              | $[Fracción]$           |
| HEC             | Hidroxietilcelulosa                                                                    | $[-]$                  |
| $WVT$           | Índice de transferencia al vapor de agua o coeficiente de transmisión de vapor de agua | $[\frac{g}{hm^2}]$     |
| MN              | Mucílago de nopal                                                                      | $[-]$                  |
| $PVA$           | Permeabilidad al vapor de agua                                                         | $[\frac{gmm}{hm^2Pa}]$ |
| $Pe$            | Permeanza                                                                              | $[\frac{g}{hm^2Pa}]$   |
| $P_t$           | Peso de la caja Petri tomado en un tiempo desconocido                                  | $[g]$                  |
| $P_M$           | Peso del mucílago de nopal obtenido                                                    | $[g]$                  |
| $P_p$           | Peso del parénquima de cada lote                                                       | $[g]$                  |
| $P_i$           | Peso inicial de la caja Petri en el ensayo                                             | $[g]$                  |
| $mi$            | Peso inicial de la muestra                                                             | $[g]$                  |
| $mf$            | Peso final de la muestra                                                               | $[g]$                  |
| E-4000          | Polietilenglicol-4000                                                                  | $[-]$                  |
| $S_p$           | Presión de vapor de saturación a la temperatura experimental                           | $[Pa]$                 |
| $R$             | Rendimiento del mucílago de nopal                                                      | $[%]$                  |
| $RT$            | Resistencia térmica de la película comestible                                          | $[%]$                  |
| $S$             | Solubilidad de la película comestible                                                  | $[%]$                  |

## B. Cálculos realizados del rendimiento de mucílago de nopal

**Cuadro B1.** Cálculos del rendimiento de mucílago de nopal (*Nopalea auberi* (Pfeiff.) Salm-Dyck)

| No. de lote | Peso parénquima (g) | Mucílago en polvo (g) | Rendimiento (%) |
|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| 01          | 232                 | 0.3681                | 0.1586          |
| 02          | 311                 | 0.8612                | 0.2769          |
| 03          | 199                 | 0.6947                | 0.3490          |
| 04          | 367                 | 1.9470                | 0.5305          |
| 05          | 226                 | 0.7166                | 0.3170          |
| 06          | 379                 | 0.4016                | 0.1059          |
| 07          | 475                 | 0.2188                | 0.0460          |
| 08          | 395                 | 0.0294                | 0.0074          |
| 09          | 255                 | 0.2014                | 0.0789          |
| 10          | 324                 | 0.2718                | 0.0838          |
| 11          | 220                 | 0.4307                | 0.1957          |
| 12          | 363                 | 0.0767                | 0.0211          |
| 13          | 214                 | 0.1472                | 0.0687          |
| 14          | 287                 | 0.0986                | 0.0343          |
| 15          | 449                 | 1.7093                | 0.3806          |
| 16          | 498                 | 0.3018                | 0.0606          |
| 17          | 239                 | 0.2282                | 0.0954          |
| 18          | 364                 | 0.0447                | 0.0122          |
| 19          | 495                 | 0.3975                | 0.0803          |
| 20          | 279                 | 0.3026                | 0.1084          |
| 21          | 419                 | 0.4106                | 0.0979          |
| 22          | 401                 | 0.5069                | 0.1264          |
| 23          | 288                 | 0.4992                | 0.1733          |
| 24          | 510                 | 0.8749                | 0.1715          |
| 25          | 377                 | 0.5870                | 0.1557          |
| 26          | 503                 | 0.5645                | 0.1122          |
| 27          | 305                 | 0.3094                | 0.1014          |
| Total       | 9374                | 13.2004               |                 |
| Promedio    |                     |                       | 0.1408          |

### C. Medición del espesor

**Cuadro C1.** Puntos de medición de la película M1-0.8

| M1-0.8   |  |            |
|----------|--|------------|
| Punto 1  |  | 0.20 mm    |
| Punto 2  |  | 0.30 mm    |
| Punto 3  |  | 0.15 mm    |
| Punto 4  |  | 0.27 mm    |
| Punto 5  |  | 0.11 mm    |
| Punto 6  |  | 0.17 mm    |
| Punto 7  |  | 0.16 mm    |
| Punto 8  |  | 0.17 mm    |
| Promedio |  | 0.19125 mm |

**Cuadro C2.** Puntos de medición de la película M2-1.0

| M2-1.0   |  |            |
|----------|--|------------|
| Punto 1  |  | 0.23 mm    |
| Punto 2  |  | 0.23 mm    |
| Punto 3  |  | 0.28 mm    |
| Punto 4  |  | 0.25 mm    |
| Punto 5  |  | 0.34 mm    |
| Punto 6  |  | 0.25 mm    |
| Punto 7  |  | 0.23 mm    |
| Punto 8  |  | 0.25 mm    |
| Promedio |  | 0.25750 mm |

**Cuadro C3.** Puntos de medición de la película M3-1.5

| M3-1.5   |  |            |
|----------|--|------------|
| Punto 1  |  | 0.35 mm    |
| Punto 2  |  | 0.35 mm    |
| Punto 3  |  | 0.50 mm    |
| Punto 4  |  | 0.28 mm    |
| Punto 5  |  | 0.40 mm    |
| Punto 6  |  | 0.25 mm    |
| Punto 7  |  | 0.35 mm    |
| Punto 8  |  | 0.35 mm    |
| Promedio |  | 0.35375 mm |

**Cuadro C4.** Puntos de medición de la película M4-0.5

| M4-0.5 |          |          |
|--------|----------|----------|
|        | Punto 1  | 0.02 mm  |
|        | Punto 2  | 0.02 mm  |
|        | Punto 3  | 0.02 mm  |
|        | Punto 4  | 0.02 mm  |
|        | Punto 5  | 0.02 mm  |
|        | Punto 6  | 0.02 mm  |
|        | Punto 7  | 0.02 mm  |
|        | Punto 8  | 0.02 mm  |
|        | Promedio | 0.020 mm |

**Cuadro C5.** Puntos de medición de la película M5-0.8

| M5-0.8 |          |            |
|--------|----------|------------|
|        | Punto 1  | 0.05 mm    |
|        | Punto 2  | 0.05 mm    |
|        | Punto 3  | 0.06 mm    |
|        | Punto 4  | 0.04 mm    |
|        | Punto 5  | 0.07 mm    |
|        | Punto 6  | 0.05 mm    |
|        | Punto 7  | 0.05 mm    |
|        | Punto 8  | 0.06 mm    |
|        | Promedio | 0.05375 mm |

**Cuadro C6.** Puntos de medición de la película M6-1.0

| M6-1.0 |         |         |
|--------|---------|---------|
|        | Punto 1 | 0.05 mm |
|        | Punto 2 | 0.06 mm |
|        | Punto 3 | 0.07 mm |
|        | Punto 4 | 0.08 mm |
|        | Punto 5 | 0.07 mm |
|        | Punto 6 | 0.08 mm |
|        | Punto 7 | 0.07 mm |
|        | Punto 8 | 0.06 mm |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| Promedio                                                   | 0.06750 mm |
| <b>Cuadro C7. Puntos de medición de la película M7-1.5</b> |            |
| M7-1.5                                                     |            |
| Punto 1                                                    | 0.11 mm    |
| Punto 2                                                    | 0.08 mm    |
| Punto 3                                                    | 0.11 mm    |
| Punto 4                                                    | 0.10 mm    |
| Punto 5                                                    | 0.09 mm    |
| Punto 6                                                    | 0.08 mm    |
| Punto 7                                                    | 0.09 mm    |
| Punto 8                                                    | 0.10 mm    |
| Promedio                                                   | 0.0950 mm  |

#### D. Cálculos de la solubilidad

**Cuadro D1. Cálculos realizados de la solubilidad de las películas comestibles**

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0285  | 0.0244  | 0.0330  |
| $mf(g)$  | 0.0064  | 0.0070  | 0.0101  |
| $S(\%)$  | 77.5438 | 71.3114 | 69.3939 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0177  | 0.0493  | 0.0233  |
| $mf(g)$  | 0.0042  | 0.0160  | 0.0081  |
| $S(\%)$  | 76.2711 | 67.5456 | 65.2360 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0245  | 0.0330  | 0.0431  |
| $mf(g)$  | 0.0057  | 0.0101  | 0.0145  |
| $S(\%)$  | 76.7346 | 69.3939 | 66.3573 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 76.8498 | 69.4169 | 66.9957 |

## E. Cálculos de la permeabilidad al vapor de agua

**Cuadro E1.** Pesos registrados de la prueba de permeabilidad al vapor de agua

| Tiempo (h) | M1-0.8 (g) | M2-1.0 (g) | M3-1.5 (g) |
|------------|------------|------------|------------|
| Ensayo 1   |            |            |            |
| 0          | 13.8515    | 13.8578    | 13.8008    |
| 1          | 13.8848    | 13.8663    | 13.8125    |
| 2          | 13.9222    | 13.8880    | 13.8258    |
| 3          | 13.9459    | 13.9086    | 13.8415    |
| 4          | 13.9543    | 13.9285    | 13.8616    |
| 5          | 13.9632    | 13.9339    | 13.8728    |
| 6          | 13.9719    | 13.9495    | 13.8836    |
| 7          | 13.9945    | 13.9716    | 13.9028    |
| 8          | 14.0202    | 13.9939    | 13.9169    |
| 9          | 14.0312    | 14.0042    | 13.9261    |
| 10         | 14.0522    | 14.0172    | 13.9431    |
| 11         | 14.0717    | 14.0321    | 13.9546    |
| 12         | 14.1022    | 14.0551    | 13.9713    |
| 13         | 14.0602    | 14.0383    | 13.9668    |
| 14         | 14.0723    | 14.0531    | 13.9821    |
| 15         | 14.0860    | 14.0657    | 13.9927    |
| 16         | 14.1047    | 14.0831    | 14.0058    |
| 17         | 14.1186    | 14.0959    | 14.0164    |
| 18         | 14.1310    | 14.1071    | 14.0250    |
| 19         | 14.1452    | 14.1151    | 14.0309    |
| 20         | 14.1511    | 14.1269    | 14.0403    |
| 21         | 14.1681    | 14.1420    | 14.0533    |
| Ensayo 2   |            |            |            |
| 0          | 13.5681    | 13.4402    | 13.6967    |
| 1          | 13.5756    | 13.4506    | 13.7012    |
| 2          | 13.5914    | 13.4626    | 13.7104    |
| 3          | 13.6090    | 13.4769    | 13.7231    |
| 4          | 13.6281    | 13.4914    | 13.7360    |
| 5          | 13.6451    | 13.5053    | 13.7478    |
| 6          | 13.6611    | 13.5168    | 13.7590    |
| 7          | 13.6785    | 13.5346    | 13.7811    |
| 8          | 13.6996    | 13.5531    | 13.8030    |

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 9  | 13.7197 | 13.5719 | 13.8179 |
| 10 | 13.7421 | 13.5904 | 13.8353 |
| 11 | 13.7546 | 13.6001 | 13.8448 |
| 12 | 13.7671 | 13.6104 | 13.8554 |
| 13 | 13.7801 | 13.6228 | 13.8672 |
| 14 | 13.7970 | 13.6373 | 13.8822 |
| 15 | 13.8077 | 13.6445 | 13.8981 |
| 16 | 13.8099 | 13.6612 | 13.9182 |
| 17 | 13.8269 | 13.6755 | 13.9283 |
| 18 | 13.8381 | 13.6855 | 13.9383 |
| 19 | 13.8520 | 13.6976 | 13.9504 |
| 20 | 13.8655 | 13.7099 | 13.9661 |
| 21 | 13.8841 | 13.7285 | 13.9838 |

### Ensayo 3

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 0  | 13.6554 | 13.6195 | 13.4830 |
| 1  | 13.6574 | 13.6375 | 13.4873 |
| 2  | 13.6671 | 13.6522 | 13.4975 |
| 3  | 13.6797 | 13.6690 | 13.5103 |
| 4  | 13.6941 | 13.6862 | 13.5245 |
| 5  | 13.7082 | 13.7013 | 13.5368 |
| 6  | 13.7220 | 13.7162 | 13.5505 |
| 7  | 13.7360 | 13.7295 | 13.5712 |
| 8  | 13.7618 | 13.7542 | 13.5952 |
| 9  | 13.7773 | 13.7780 | 13.6164 |
| 10 | 13.7954 | 13.7903 | 13.6264 |
| 11 | 13.8060 | 13.8009 | 13.6359 |
| 12 | 13.8171 | 13.8128 | 13.6471 |
| 13 | 13.8313 | 13.8279 | 13.6608 |
| 14 | 13.8455 | 13.8412 | 13.6757 |
| 15 | 13.8550 | 13.8428 | 13.6917 |
| 16 | 13.8762 | 13.8575 | 13.7109 |
| 17 | 13.8869 | 13.8692 | 13.7216 |
| 18 | 13.8977 | 13.8818 | 13.7325 |
| 19 | 13.9117 | 13.8961 | 13.7461 |
| 20 | 13.9286 | 13.9127 | 13.7623 |
| 21 | 13.9475 | 13.9321 | 13.7816 |

**Cuadro E2.** Aumentos registrados de la prueba de permeabilidad al vapor de agua

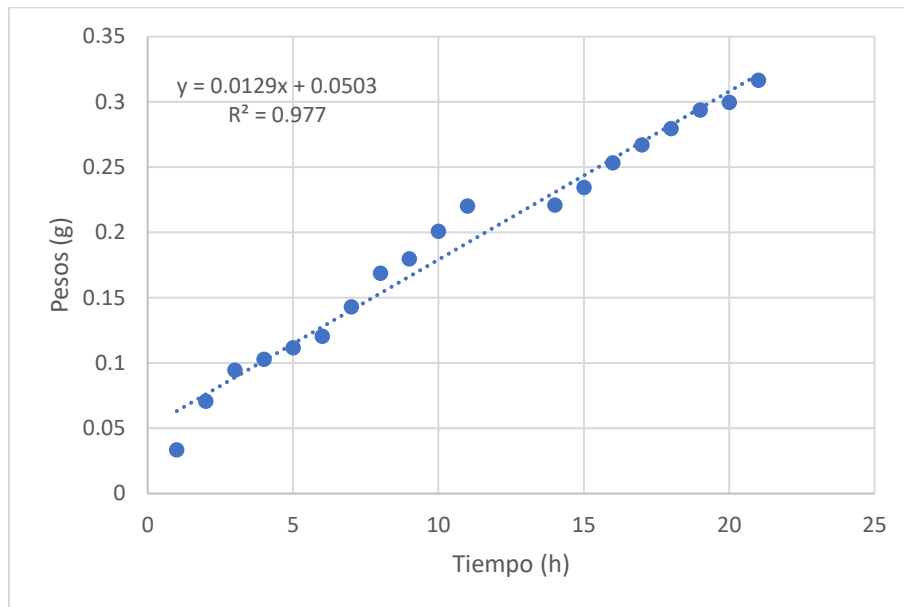
| Tiempo (h) | M1-0.8 (g) | M2-1.0 (g) | M3-1.5 (g) |
|------------|------------|------------|------------|
| Ensayo 1   |            |            |            |
| 1          | 0.0333     | 0.0085     | 0.0117     |
| 2          | 0.0707     | 0.0302     | 0.0250     |
| 3          | 0.0944     | 0.0508     | 0.0407     |
| 4          | 0.1028     | 0.0707     | 0.0608     |
| 5          | 0.1117     | 0.0761     | 0.0720     |
| 6          | 0.1204     | 0.0917     | 0.0828     |
| 7          | 0.1430     | 0.1138     | 0.1020     |
| 8          | 0.1687     | 0.1361     | 0.1161     |
| 9          | 0.1797     | 0.1464     | 0.1253     |
| 10         | 0.2007     | 0.1594     | 0.1423     |
| 11         | 0.2202     | 0.1743     | 0.1538     |
| 12         | 0.2507     | 0.1973     | 0.1705     |
| 13         | 0.2087     | 0.1805     | 0.1660     |
| 14         | 0.2208     | 0.1953     | 0.1813     |
| 15         | 0.2345     | 0.2079     | 0.1919     |
| 16         | 0.2532     | 0.2253     | 0.2050     |
| 17         | 0.2671     | 0.2381     | 0.2156     |
| 18         | 0.2795     | 0.2493     | 0.2242     |
| 19         | 0.2937     | 0.2573     | 0.2301     |
| 20         | 0.2996     | 0.2691     | 0.2395     |
| 21         | 0.3166     | 0.2842     | 0.2525     |
| Ensayo 2   |            |            |            |
| 1          | 0.0075     | 0.0104     | 0.0045     |
| 2          | 0.0233     | 0.0224     | 0.0137     |
| 3          | 0.0409     | 0.0367     | 0.0264     |
| 4          | 0.0600     | 0.0512     | 0.0393     |
| 5          | 0.0770     | 0.0651     | 0.0511     |
| 6          | 0.0930     | 0.0766     | 0.0623     |
| 7          | 0.1104     | 0.0944     | 0.0844     |
| 8          | 0.1315     | 0.1129     | 0.1063     |
| 9          | 0.1516     | 0.1317     | 0.1212     |
| 10         | 0.1740     | 0.1502     | 0.1386     |
| 11         | 0.1865     | 0.1599     | 0.1481     |
| 12         | 0.1990     | 0.1702     | 0.1587     |

|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 13 | 0.2120 | 0.1826 | 0.1705 |
| 14 | 0.2289 | 0.1971 | 0.1855 |
| 15 | 0.2396 | 0.2043 | 0.2014 |
| 16 | 0.2418 | 0.2210 | 0.2215 |
| 17 | 0.2588 | 0.2353 | 0.2316 |
| 18 | 0.2700 | 0.2453 | 0.2416 |
| 19 | 0.2839 | 0.2574 | 0.2537 |
| 20 | 0.2974 | 0.2697 | 0.2694 |
| 21 | 0.3160 | 0.2883 | 0.2871 |

### Ensayo 3

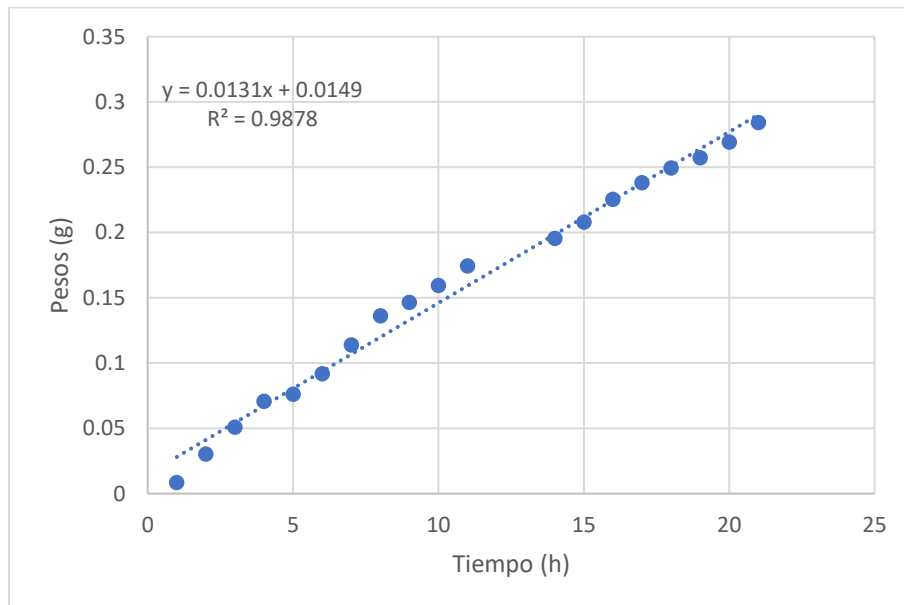
|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 1  | 0.0020 | 0.0180 | 0.0043 |
| 2  | 0.0117 | 0.0327 | 0.0145 |
| 3  | 0.0243 | 0.0495 | 0.0273 |
| 4  | 0.0387 | 0.0667 | 0.0415 |
| 5  | 0.0528 | 0.0818 | 0.0538 |
| 6  | 0.0666 | 0.0967 | 0.0675 |
| 7  | 0.0806 | 0.1100 | 0.0882 |
| 8  | 0.1064 | 0.1347 | 0.1122 |
| 9  | 0.1219 | 0.1585 | 0.1334 |
| 10 | 0.1400 | 0.1708 | 0.1434 |
| 11 | 0.1506 | 0.1814 | 0.1529 |
| 12 | 0.1617 | 0.1933 | 0.1641 |
| 13 | 0.1759 | 0.2084 | 0.1778 |
| 14 | 0.1901 | 0.2217 | 0.1927 |
| 15 | 0.1996 | 0.2233 | 0.2087 |
| 16 | 0.2208 | 0.2380 | 0.2279 |
| 17 | 0.2315 | 0.2497 | 0.2386 |
| 18 | 0.2423 | 0.2623 | 0.2495 |
| 19 | 0.2563 | 0.2766 | 0.2631 |
| 20 | 0.2732 | 0.2932 | 0.2793 |
| 21 | 0.2921 | 0.3126 | 0.2986 |

**Figura E1.** Gráfica de regresión lineal para M1-0.8 (Ensayo 1)



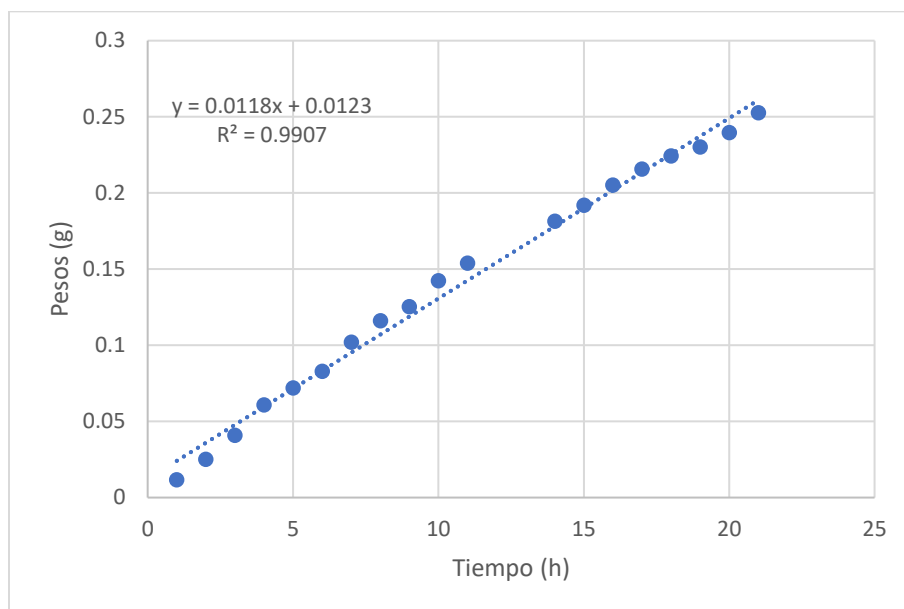
Nota: Se descartaron los valores del tiempo 12 y 13 de la Tabla E2 para mejorar la ecuación de la recta.

**Figura E2.** Gráfica de regresión lineal para M2-1.0 (Ensayo 1)



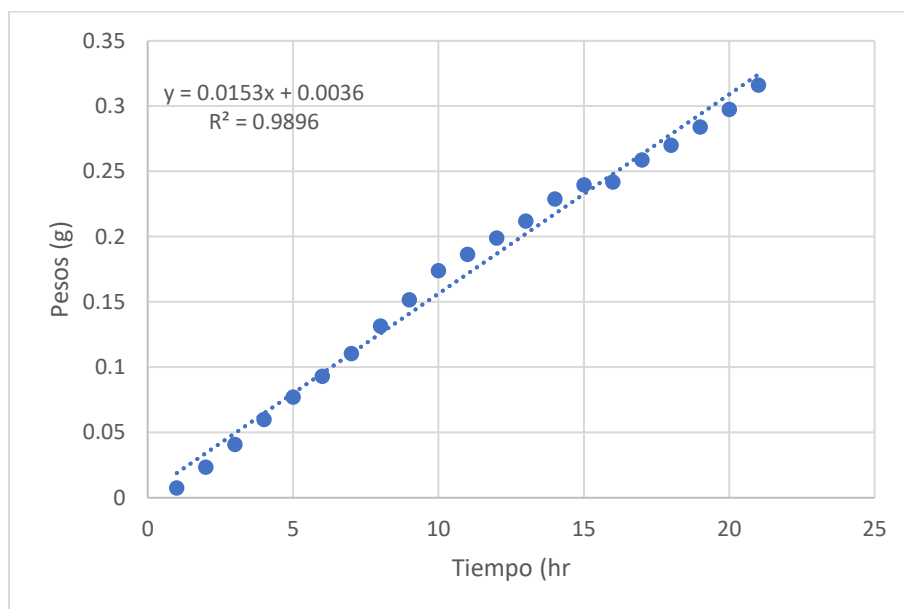
Nota: Se descartaron los valores 12 y 13 del ensayo 1 de Tabla E2 para mejorar la ecuación de la recta.

**Figura E3.** Gráfica de regresión lineal para M3-1.5 (Ensayo 1)

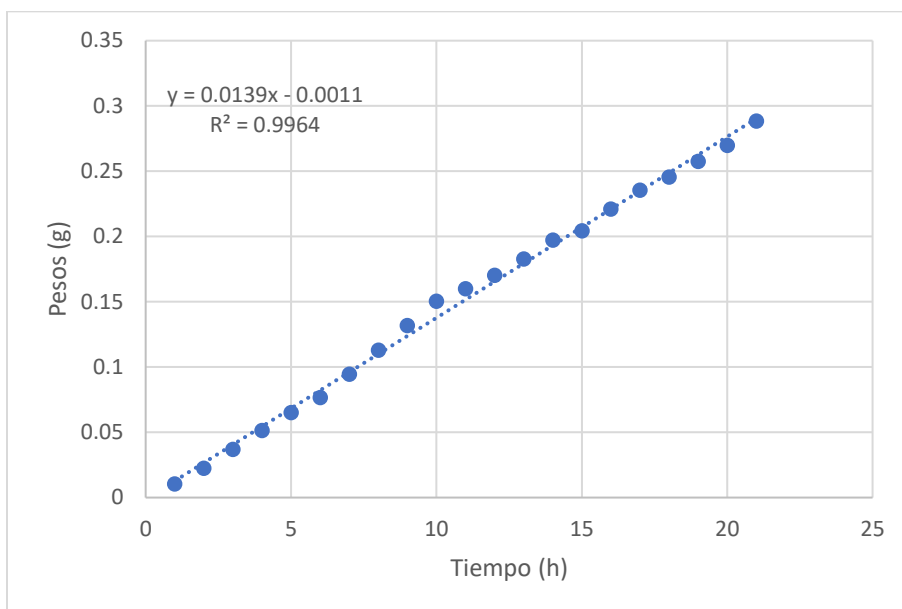


Nota: Se descartaron los valores 12 y 13 del ensayo 1 de Tabla E2 para mejorar la ecuación de la recta.

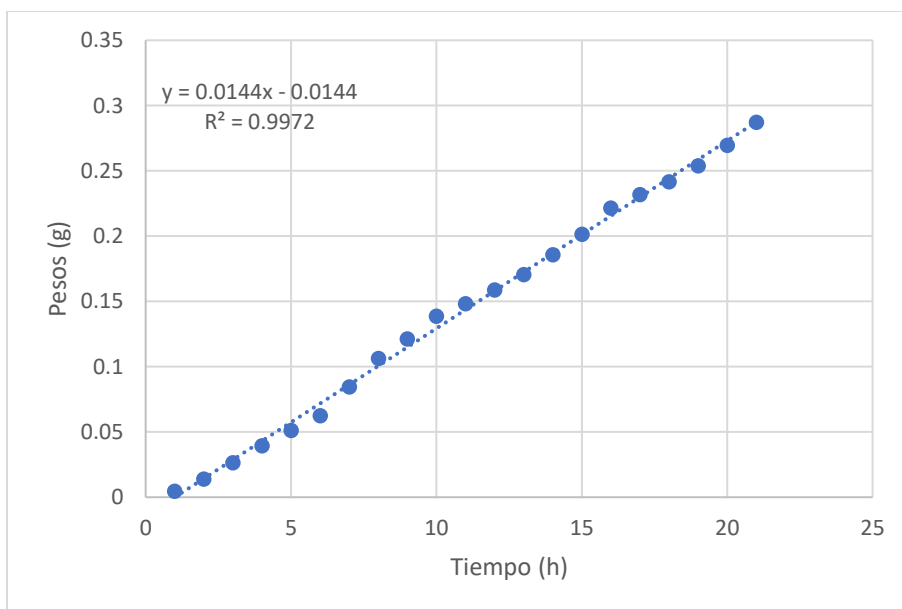
**Figura E4.** Gráfica de regresión lineal para M1-0.8 (Ensayo 2)



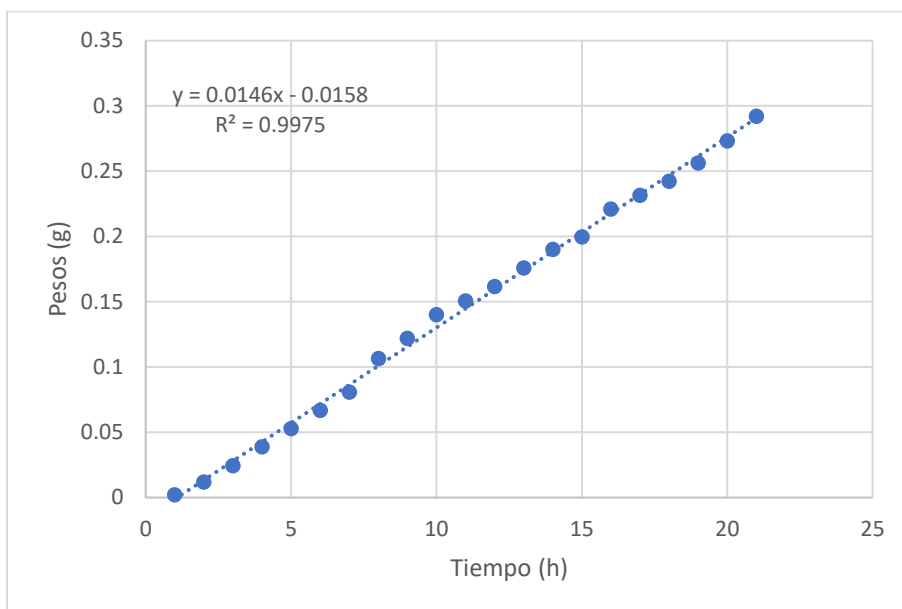
**Figura E5.** Gráfica de regresión lineal para M2-1.0 (Ensayo 2)



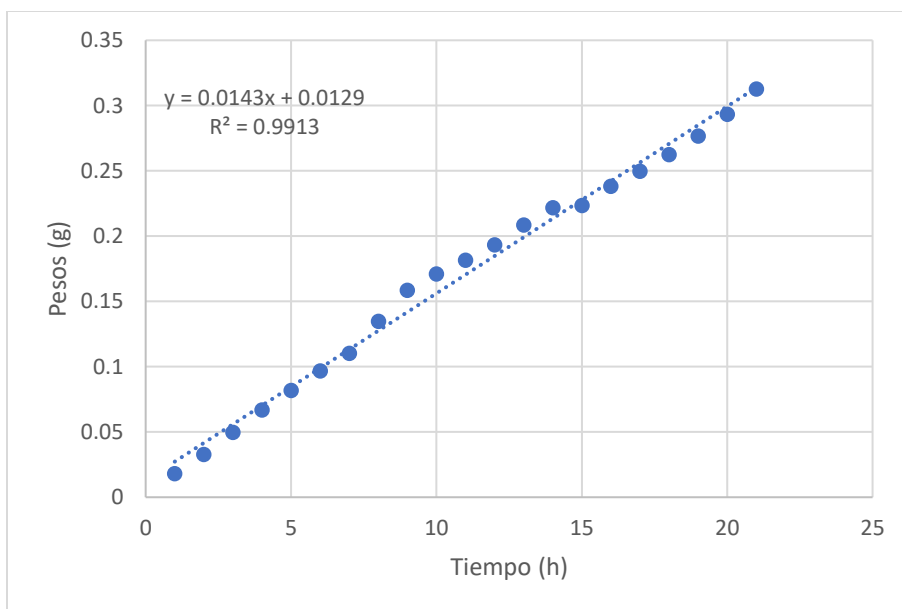
**Figura E6.** Gráfica de regresión lineal para M3-1.5 (Ensayo 2)



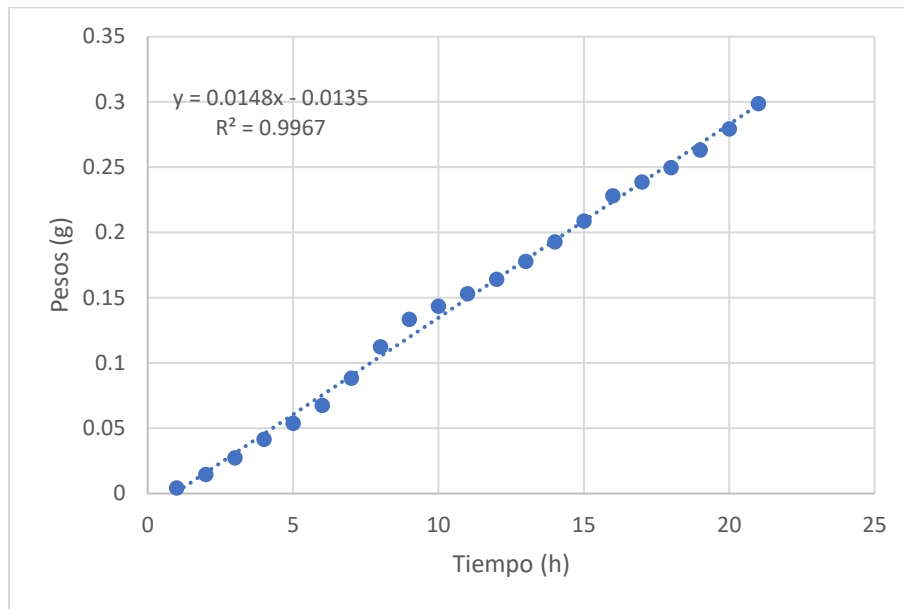
**Figura E7.** Gráfica de regresión lineal para M1-0.8 (Ensayo 3)



**Figura E8.** Gráfica de regresión lineal para M2-1.0 (Ensayo 3)



**Figura E9.** Gráfica de regresión lineal para M3-1.5 (Ensayo 3)



**Cuadro E3.** Cálculos realizados de permeabilidad al vapor de agua de las películas comestibles

| Película        | $\frac{dm}{dt} \left( \frac{g}{h} \right)$ | $WVT \left( \frac{g}{hm^2} \right)$ | $Pe \left( \frac{g}{hm^2 Pa} \right)$ | $PVA \left( \frac{gmm}{hm^2 Pa} \right)$ |
|-----------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| Ensayo 1-M1-0.8 | 0.0129                                     | 5.6327                              | $6.0892 \times 10^{-03}$              | $1.1646 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 2-M1-0.8 | 0.0153                                     | 6.6806                              | $7.2221 \times 10^{-03}$              | $1.3812 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 3-M1-0.8 | 0.0146                                     | 6.3750                              | $6.8917 \times 10^{-03}$              | $1.3180 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 1-M2-1.0 | 0.0131                                     | 5.7200                              | $6.1836 \times 10^{-03}$              | $1.5923 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 2-M2-1.0 | 0.0139                                     | 6.0693                              | $6.5613 \times 10^{-03}$              | $1.6895 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 3-M2-1.0 | 0.0143                                     | 6.2440                              | $6.7501 \times 10^{-03}$              | $1.7381 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 1-M3-1.5 | 0.0118                                     | 5.1524                              | $5.5700 \times 10^{-03}$              | $1.9704 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 2-M3-1.5 | 0.0144                                     | 6.2877                              | $6.7973 \times 10^{-03}$              | $2.4045 \times 10^{-03}$                 |
| Ensayo 3-M3-1.5 | 0.0148                                     | 6.4623                              | $6.9861 \times 10^{-03}$              | $2.4713 \times 10^{-03}$                 |

## F. Cálculos de la resistencia térmica

**Cuadro F1.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 50° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0788  | 0.0964  | 0.0527  |
| $mf(g)$  | 0.0218  | 0.0376  | 0.0239  |
| $S(\%)$  | 72.3350 | 60.9958 | 54.6489 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1009  | 0.0676  | 0.0853  |
| $mf(g)$  | 0.0302  | 0.0211  | 0.0332  |
| $S(\%)$  | 70.0693 | 68.7869 | 61.0785 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1000  | 0.0753  | 0.1139  |
| $mf(g)$  | 0.0299  | 0.0301  | 0.0529  |
| $S(\%)$  | 70.1000 | 60.0265 | 53.5557 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 70.8347 | 63.2697 | 56.4277 |
| $RT(\%)$ | 29.1653 | 36.7033 | 43.5723 |

**Cuadro F2.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 60° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0698  | 0.0841  | 0.0751  |
| $mf(g)$  | 0.0238  | 0.0295  | 0.0244  |
| $S(\%)$  | 65.9025 | 64.9227 | 67.5099 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1029  | 0.0789  | 0.0777  |
| $mf(g)$  | 0.0389  | 0.0248  | 0.0325  |
| $S(\%)$  | 62.1963 | 68.5678 | 58.1724 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0786  | 0.1124  | 0.0543  |
| $mf(g)$  | 0.0107  | 0.0388  | 0.0221  |
| $S(\%)$  | 86.3867 | 65.4804 | 59.3001 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 71.4951 | 66.3236 | 61.6608 |
| $RT(\%)$ | 28.5049 | 33.6764 | 38.3392 |

**Cuadro F3.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 70° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1078  | 0.1266  | 0.0451  |
| $mf(g)$  | 0.0286  | 0.0286  | 0.0149  |
| $S(\%)$  | 73.4693 | 77.4091 | 66.9623 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1267  | 0.1043  | 0.0558  |
| $mf(g)$  | 0.0323  | 0.0391  | 0.0225  |
| $S(\%)$  | 74.5067 | 62.5119 | 59.6774 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1112  | 0.0850  | 0.0904  |
| $mf(g)$  | 0.0338  | 0.0310  | 0.0346  |
| $S(\%)$  | 69.6043 | 63.5294 | 61.7256 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 72.5267 | 67.8168 | 62.7884 |
| $RT(\%)$ | 27.4733 | 32.1832 | 37.2116 |

**Cuadro F4.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 80° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0733  | 0.1053  | 0.0801  |
| $mf(g)$  | 0.0179  | 0.0280  | 0.0288  |
| $S(\%)$  | 75.5798 | 73.4093 | 64.0449 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0509  | 0.0786  | 0.0820  |
| $mf(g)$  | 0.0130  | 0.0201  | 0.0297  |
| $S(\%)$  | 74.4597 | 74.4274 | 63.7804 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0773  | 0.0985  | 0.0517  |
| $mf(g)$  | 0.0206  | 0.0284  | 0.0186  |
| $S(\%)$  | 73.3505 | 71.1675 | 64.0232 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 74.4633 | 73.0014 | 63.9495 |
| $RT(\%)$ | 25.5367 | 26.9986 | 36.0505 |

**Cuadro F5.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 90° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0661  | 0.1017  | 0.1332  |
| $mf(g)$  | 0.0096  | 0.0260  | 0.0486  |
| $S(\%)$  | 85.4765 | 74.4346 | 63.5135 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0694  | 0.0627  | 0.0428  |
| $mf(g)$  | 0.0136  | 0.0134  | 0.0154  |
| $S(\%)$  | 80.4034 | 78.6283 | 64.0186 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1096  | 0.0509  | 0.0564  |
| $mf(g)$  | 0.0209  | 0.0093  | 0.0129  |
| $S(\%)$  | 80.9306 | 81.7288 | 77.1276 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 82.2701 | 78.2639 | 68.2199 |
| $RT(\%)$ | 17.7299 | 21.7361 | 31.7801 |

**Cuadro F6.** Cálculos realizados de la resistencia térmica de la película a 95° C

| Película | M1-0.8  | M2-1.0  | M3-1.5  |
|----------|---------|---------|---------|
| Ensayo 1 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0928  | 0.0774  | 0.0753  |
| $mf(g)$  | 0.0145  | 0.0174  | 0.0206  |
| $S(\%)$  | 84.3750 | 77.5193 | 72.6467 |
| Ensayo 2 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.0692  | 0.0597  | 0.1445  |
| $mf(g)$  | 0.0103  | 0.0133  | 0.0340  |
| $S(\%)$  | 85.1156 | 77.7219 | 76.4705 |
| Ensayo 3 |         |         |         |
| $mi(g)$  | 0.1458  | 0.0734  | 0.0502  |
| $mf(g)$  | 0.0224  | 0.0098  | 0.0107  |
| $S(\%)$  | 84.6364 | 86.6485 | 78.6852 |
| Promedio |         |         |         |
| $S(\%)$  | 84.7090 | 80.6299 | 75.9341 |
| $RT(\%)$ | 15.2910 | 19.3701 | 24.0659 |