

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---



**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS  
BIOLÓGICAS**

Área: Biotecnología Alimentaria.

**TESIS**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN  
DEL MUCÍLAGO DE CINCO ESPECIES DE *Opuntia*  
(L.) Miller DE MICHOACÁN.**

Para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

Presenta:  
**IBQ. Eder Zavala Mendoza**

Director de Tesis:  
**D.C. Héctor Eduardo Martínez Flores**

Morelia Michoacán, México

Marzo 2012



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
*Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas*

---

DR. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES  
COORDINADOR GENERAL DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
P R E S E N T E

Por este conducto nos permitimos comunicarle que después de haber revisado el manuscrito final de la Tesis Titulada: "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CINCO ESPECIES DE *Opuntia* (L) MILLER DE MICHOACÁN" presentado por el IBQ. EDER ZAVALA MENDOZA, consideramos que reúne los requisitos suficientes para ser publicado y defendido en Examen de Grado de Maestro en Ciencias.

Sin otro particular por el momento, reiteramos a usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE

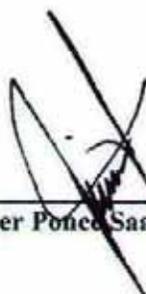
Morelia, Michoacán, a 14 de febrero de 2012

MIEMBROS DE LA COMISIÓN REVISORA

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Carla Karina Chávez Moreno

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Javier Ponce Saavedra

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Isidro Aranda Sánchez

## **DEDICATORIAS**

### **A JEHOVÁ DIOS**

Por otorgarme el maravilloso don de la vida, por permitirme tener el gran privilegio de disfrutar de su amistad, por guiarme espiritualmente y ayudarme a conocer el verdadero propósito de la vida. “Ciertamente te elogiaré, oh Jehová, con todo mi corazón; de veras declararé todas tus maravillosas obras” (Salmo 9:1). Por siempre gracias.

### **A MIS PADRES**

A quienes admiro y aprecio con todo mi corazón, me han enseñado siempre excelentes valores, a luchar por nuestras metas, por otorgarme la mejor educación, por la hermosa y unida familia que tenemos. Gracias por su interminable apoyo, paciencia, dedicación, consejos y ejemplo de vida.

### **A MIS HERMANOS Y SOBRINOS**

Néstor, Omar, Janeth, Sandra, Febe, Mara y Yire, gracias por formar parte de mi vida, por sus buenos consejos y apoyo, los quiero mucho. A mis sobrinos: Jaqueline, Omar, Alessandra, Ian, Jesenia, Jimena y Alan, a quienes también quiero mucho.

### **A MIS AMIGOS**

Ustedes saben quienes son... Por compartir buenos y malos momentos de mi vida, por su apoyo, confianza y aprecio. “Un compañero verdadero ama en todo tiempo, y es un hermano nacido para cuando hay angustia” (Proverbios 17:17). Gracias por su valiosa amistad.

## AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Héctor Eduardo Martínez Flores**, por ser mi asesor de Tesis, gracias por su apoyo, confianza y gracias por compartir sus conocimientos.

A la **Dra. Carla Karina Chávez Moreno**, le quiero expresar de forma muy especial mi agradecimiento, por todo su apoyo, guía y confianza en mí. Gracias por sus buenos consejos, valiosas lecciones, su tiempo y su ejemplo como profesional y persona.

Al **Dr. Javier Ponce Saavedra**, por sus buenas clases de estadística, que dieron fruto en esta investigación, reciba mi agradecimiento sincero por sus buenos consejos y sugerencias, he aprendido mucho de usted.

A la **Dra. Guadalupe Garnica Romo** y el **Dr. Jorge Isidro Aranda Sánchez** por ser parte del comité tutorial, sus críticas y sugerencias en cada una de las revisiones me permitieron dar mayor calidad a mi trabajo.

Al **Dr. Juan Carlos González Hernández**, por todas las facilidades para trabajar en el Instituto Tecnológico de Morelia.

A **Samanta, Sarahi y Kyra**, gracias por su apoyo, ayuda en el laboratorio, sugerencias, compartir su amistad y muy buenos momentos. También a **Liz y Marce** por su apoyo, y a todos los compañeros del Laboratorio de investigación y desarrollo en alimentos.

A **Elia** por su ayuda y compartir sus paquetes estadísticos que fueron fundamentales. También gracias a **Mireya y Diana** que me ayudaron en algunas técnicas.

A mi **Papá** por acompañarme y ayudarme en las colectas, a mis amigos **Ángel, Héctor, Alexis, Juanito** y el **Chekes** que se espinaron conmigo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por otorgarme la beca estos dos años de maestría.

Al **Herbario del Instituto de Ecología, A.C., México (IE-BAJÍO)**, y al **Jardín Botánico del Centro de Investigaciones en Ecosistemas UNAM**, por abrirnos las puertas.

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y al **Instituto Tecnológico de Morelia**, gracias a las personas que nos facilitaron el uso del equipo y recursos necesarios.

La lista es larga... a todos aquellos que por descuido no menciono de verdad mi agradecimiento total es para ustedes, para cada uno de los que me apoyaron y ayudaron durante estos dos años.

# CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>4</b>
2.1 EL NOPAL.....	4
2.1.1 GENERALIDADES .....	4
2.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NOPAL.....	6
2.1.3 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y SUPERFICIE CUBIERTA DE NOPAL A NIVEL MUNDIAL .....	8
2.1.4 APLICACIONES Y USOS DEL NOPAL.....	10
2.2 MUCÍLAGO DE NOPAL.....	14
2.2.1 GENERALIDADES .....	14
2.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO .....	16
2.2.3 USOS DEL MUCÍLAGO .....	16
2.2.4 BENEFICIOS DEL CONSUMO DE MUCÍLAGO.....	18
2.2.5 EXTRACCIÓN DEL MUCÍLAGO Y RENDIMIENTOS.....	18
2.3 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS .....	20
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>21</b>
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	<b>22</b>
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
GENERAL .....	23
PARTICULARES .....	23

<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
6.1 MATERIA PRIMA .....	24
6.2 BÚSQUEDA Y LOCALIZACIÓN GEORREFERIDA DE POBLACIONES SILVESTRES DE ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> EN MICHOACÁN .....	24
6.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN .....	24
6.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN	25
6.4.1 DESHIDRATADO DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN .....	25
6.4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN	25
6.5 EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO .....	26
6.6 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL .....	27
6.6.1 OPTIMIZACIÓN INICIAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	27
6.6.2 SEGUNDA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	29
6.6.3 OPTIMIZACIÓN FINAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	30
6.7 COMPARACIÓN MEDIDA EN % DE RENDIMIENTO DE MUCÍLAGO ENTRE EL MÉTODO OPTIMIZADO Y EL INICIAL .....	31
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>33</b>
7.1 BÚSQUEDA Y LOCALIZACIÓN GEORREFERIDA DE POBLACIONES SILVESTRES DE ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> .....	33
7.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN .....	35
7.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN	39
7.3.1 DESHIDRATADO DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN .....	39
7.3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN	40
7.4 EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO EN ESPECIES SILVESTRES DE <i>OPUNTIA</i> DE MICHOACÁN.....	41

7.5	OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL .....	42
7.5.1	OPTIMIZACIÓN INICIAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	42
7.5.2	SEGUNDA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	51
7.5.3	OPTIMIZACIÓN FINAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	61
7.6	COMPARACIÓN MEDIDA EN PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE MUCÍLAGO ENTRE EL MÉTODO OPTIMIZADO Y EL INICIAL.....	67
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>9.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>10.</b>	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>74</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>APÉNDICE I.....</b>	<b>ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE MATERIA PRIMA .....</b>	<b>86</b>
<b>APÉNDICE II.....</b>	<b>RECUPERACIÓN DE ETANOL USADO EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO POR DESTILACIÓN .....</b>	<b>92</b>
<b>APÉNDICE III.....</b>	<b>DESHIDRATACIÓN DE NOPAL.....</b>	<b>94</b>
<b>APÉNDICE IV.....</b>	<b>MUCÍLAGOS DE ESPECIES DE <i>Opuntia</i> EN ESTUDIO .....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación taxonómica de las especies de <i>Opuntia</i> en estudio.....	4
<b>Tabla 2.</b> Análisis bromatológico de nopal fresco, reportado por varios autores (100 g de peso neto de nopal fresco).....	7
<b>Tabla 3.</b> Composición química de cladodios de distintas edades de <i>Opuntia ficus-indica</i> (%). ..	7
<b>Tabla 4.</b> Superficie cultivada con nopal en México .....	9
<b>Tabla 5.</b> Productos alimenticios, subproductos y aditivos obtenidos de las tunas y los cladodios.....	11
<b>Tabla 6.</b> Propiedades del nopal ( <i>Opuntia</i> spp.) con aplicación farmacéutica.....	12
<b>Tabla 7.</b> Peso Molecular (PM) y monómeros (galactosa, ramnosa, arabinosa, xilosa, ácido galacturónico) presentes en mucílago de <i>Opuntia</i> spp .....	15
<b>Tabla 8.</b> Composición química del mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> en diferentes procesos de extracción.....	16
<b>Tabla 9.</b> Rendimientos de extracción de mucílago de nopal fresco ( <i>Opuntia</i> spp) .....	20
<b>Tabla 10.</b> Distribución de las especies <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> en Michoacán.....	33
<b>Tabla 11.</b> Valores medios de las variables morfométricas de las especies <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	36
<b>Tabla 12.</b> Atributos cualitativos de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	37
<b>Tabla 13.</b> Forma y altura de la planta de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	38
<b>Tabla 14.</b> Fenología de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	38
<b>Tabla 15.</b> Rendimientos en deshidratado de cladodios de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	39
<b>Tabla 16.</b> Composición química (%) de cladodios secos de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	40
<b>Tabla 17.</b> Composición de fibra dietética soluble, insoluble y total (%) de cladodios secos de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	40
<b>Tabla 18.</b> Rendimientos de mucílago de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> . .....	41
<b>Tabla 19.</b> Niveles codificados y reales de las variables que afectan el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización inicial. ....	42
<b>Tabla 20.</b> Diseño Box Behnken para la optimización inicial del proceso de extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán.....	44
<b>Tabla 21.</b> Análisis de la varianza para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización inicial. ....	45

<b>Tabla 22.</b> Análisis de la falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización inicial.....	46
<b>Tabla 23.</b> Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, optimización inicial. ....	47
<b>Tabla 24.</b> Valores reales de las variables codificadas de la optimización inicial para el modelo de rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán.....	48
<b>Tabla 25.</b> Diseño experimental y rendimiento de mucílago seco (%) en función del tiempo de centrifugado en el proceso de extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán. ....	49
<b>Tabla 26.</b> Niveles codificados y reales de las variables que afectan el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	51
<b>Tabla 27.</b> Resultados del diseño Box Behnken para la segunda optimización del proceso de extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización..	52
<b>Tabla 28.</b> Análisis de la varianza para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	53
<b>Tabla 29.</b> Falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	54
<b>Tabla 30.</b> Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	55
<b>Tabla 31.</b> Valores reales de las variables codificadas para el modelo de rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	56
<b>Tabla 32.</b> Diseño factorial 2 <sup>2</sup> para la optimización final del proceso de extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán. ....	62
<b>Tabla 33.</b> Análisis de la varianza del factorial 2 <sup>2</sup> para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización final. ....	63
<b>Tabla 34.</b> Análisis de la falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización final. ....	64
<b>Tabla 35.</b> Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la optimización final. ....	64
<b>Tabla 36.</b> Comparación de los rendimientos de extracción de mucílago de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> de Michoacán, comparando los métodos de extracción inicial y optimizado.....	68
<b>Tabla 37.</b> Nivel de mejora del método optimizado con respecto al método inicial, medido en % de rendimiento de mucílago seco para las especies de <i>Opuntia</i> estudiadas. ....	69
<b>Tabla 38.</b> Comparación de medias del porcentaje de rendimiento de mucílago de <i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> , y <i>O. tomentosa</i> para el método optimizado (Prueba de Tukey-Kramer HSD).....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Opuntia tomentosa</i> (nopal).....	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama de bloques de los diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal.....	19
<b>Figura 3.</b> Metodología general propuesta para la extracción de mucílago, indicando el uso integral del nopal.....	26
<b>Figura 4.</b> Diagrama de operaciones para la extracción de mucílago de nopal, optimización inicial. ....	28
<b>Figura 5.</b> Diagrama de operaciones para la extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, segunda optimización. ....	29
<b>Figura 6.</b> Representación del diseño factorial 2 <sup>2</sup> .....	31
<b>Figura 7.</b> Fotografías de cinco especies de <i>Opuntia</i> de Michoacán, en campo. A) <i>O. atropes</i> , B) <i>O. hyptiacantha</i> , C) <i>O. joconostle</i> , D) <i>O. streptacantha</i> y E) <i>O. tomentosa</i> .....	34
<b>Figuras 8.</b> Colecta de nopales.....	35
<b>Figura 9.</b> Análisis de varianza de la variable tiempo de centrifugado en dos niveles (ANOVA, $\alpha=0.05$ ). ....	50
<b>Figura 10.</b> Diagrama de Pareto de efectos estimados de las variables sobre el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, en la segunda optimización.....	57
<b>Figura 11.</b> Rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán en función de las variables de extracción (N:A = Proporción nopal agua; TE (°C) = Temperatura y tiemp. E (h) = Tiempo de extracción), segunda optimización.....	57
<b>Figura 12.</b> Gráfico de cubo y respuesta predicha para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, segunda optimización.....	58
<b>Figura 13.</b> Gráficos de contornos para la extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, segunda optimización.....	59
<b>Figura 14.</b> Gráficos de superficie de respuesta del modelo ajustado para la extracción de mucílago de <i>O. tomentosa</i> en la estación de verano.....	60
<b>Figura 15.</b> Representación de los efectos principales de las variables del proceso de extracción de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, sobre el rendimiento en la optimización final...	65
<b>Figura 16.</b> Gráfico de cubo y respuesta predicha para el rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán, optimización final.....	66
<b>Figura 17.</b> Gráfico de superficie de respuesta del modelo ajustado. Rendimiento de mucílago de <i>Opuntia tomentosa</i> de Michoacán en función de las variables de extracción, optimización final.....	67
<b>Figura 18.</b> Análisis de varianza del porcentaje de rendimiento de mucílago de cinco especies de <i>Opuntia</i> , comparando dos métodos de extracción. A) <i>O. atropes</i> B) <i>O. hyptiacantha</i> C) <i>O. joconostle</i> D) <i>O. streptacantha</i> E) <i>O. tomentosa</i> .....	70
<b>Figura 19.</b> Análisis de varianza del porcentaje de rendimiento de mucílago de cinco especies de <i>Opuntia</i> . Método Optimizado (ANOVA, $\alpha=0.05$ ). ....	71

## RESUMEN

La mayoría de las investigaciones de *Opuntia* se centran en *Opuntia ficus-indica*, aunque la concentración de mucílago en otros nopales, su conformación polimérica y propiedades reológicas representa un potencial aprovechable para las industrias; alimentaria (aditivo natural y elaboración de películas comestibles) y farmacéutica (protege la mucosa del tracto digestivo y acelera su restauración en caso de gastritis alcohólica). Todas las valiosas y atractivas propiedades del mucílago de nopal, podrían ser aprovechadas al máximo si se mejoran los rendimientos de extracción del mucílago e nopal (Sáenz *et al.* 2006). El objetivo del presente trabajo es optimizar la metodología de extracción de mucílago de cinco especies de *Opuntia* del estado de Michoacán, poco estudiadas y documentadas, estableciendo una alternativa para su industrialización. La metodología consiste en georreferir las poblaciones silvestres de *Opuntia* en estudio, así como su caracterización morfológica. La caracterización de la materia prima y mucílago incluye, análisis de proteína, humedad, cenizas, extracto etéreo, carbohidratos totales por los métodos de la AOAC (1990) y AACC (2000), fibra dietética soluble, insoluble y total (Prosky *et al.*, 1988). Para la extracción de mucílago se usa el método modificado por Rodríguez (2010) en base a Forni *et al.* (1994). La metodología de superficie respuesta fue usada para la optimización del proceso de extracción de mucílago. Finalmente se realizó la comparación medida en porcentaje de rendimiento de mucílago entre el método optimizado y el inicial. Poblaciones de *Opuntia atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* fueron localizadas y georreferidas en el estado de Michoacán. La caracterización morfológica permitió reconocer las especies *in situ* y garantizar su identidad taxonómica. La caracterización química mostró varias diferencias entre las especies. Las condiciones optimizadas para cada una de las variables que intervienen en el proceso de extracción de mucílago de nopal, a fueron: Relación nopal: agua 1:8 (w/V), Temperatura de extracción 83 °C, Tiempo de extracción 2 h y Tiempo de centrifugado de 15 min; prediciendo un rendimiento superior al 1.51%. Las condiciones del proceso optimizadas permitieron obtener mayores rendimientos que el método inicial; *O. joconostle* con un 3.21 %, seguida por *O. atropes* (2.62%), y *O. tomentosa* (1.81%) y *O. hyptiacantha* (2.11%) sin diferencia significativa entre sus medias.

## ABSTRACT

Most research focus on *Opuntia ficus-indica*, although the concentration of mucilage in others cactus pear is greater, its composition and rheological properties of polymer is a potential for profitable industries, food (natural food additive and processing of edible films) and pharmaceutical (protects the lining of the digestive tract and accelerates restoration if alcoholic gastritis). All valuable and attractive properties of cactus mucilage could be exploited to the fullest if the extraction yields and cactus mucilage were improved (Saenz et al. 2006). The aim of this study is to optimize the methodology of extraction of the mucilage of five species of *Opuntia* endemic of Michoacán, poorly studied and documented, providing an alternative for industrializing. The methodology consists on georeferenced wild populations of *Opuntia* and their morphological characterization. The raw material and the mucilage characterization includes the following analysis: protein, moisture, ashes, ether extract, total carbohydrates (AOAC (1990) and AACC (2000)), soluble dietary, insoluble and total fiber (Prosky et al., 1988). The *Opuntia* mucilage was extracted through a modified method used by Rodriguez (2010) based on Forni et al. (1994). The response surface methodology was used to optimize the extraction process of mucilage. Finally, the yield of mucilage between the initial and the optimized method were compared. Populations of *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, and *O. tomentosa* were localized in the state of Michoacán. Morphological characterization allowed us to recognize the species in situ and ensure their taxonomic identity. The chemical characterization showed several differences between species. The optimized conditions for each of the variables involved in the extraction of mucilage from cactus pear, were: Relationship cactus pear: water 1:8 (w / V), extraction temperature 83 ° C, Extraction time 2 h and time Spin cycle of 15 min, predicting an yield greater than 1.51%. The optimized process led obtained the higher yields than the initial method; *O. joconostle* with the best yield (3.21%), followed by *O. atropes* (2.62%) and *O. tomentosa* (1.81%) and *O. hyptiacantha* (2.11%) with no significant difference in means between them.

# 1. INTRODUCCIÓN

La importancia del uso y aprovechamiento del nopal en México es superior a la de cualquier otro país en el mundo. El nopal ha representado, para los mexicanos, en su desarrollo histórico, una de las plantas más relevantes y de mayor significado cultural, ambiental, económico y social. Su valor cultural y biótico ha quedado plasmado en códices, pinturas y bibliografías antiguas, lo que se puede observar en la iconografía de la gran Tenochtitlan o en el actual Escudo Nacional (Bravo y Scheinvar, 1999; Pimienta, 1990).

Algunas especies de *Opuntia*, han sido utilizadas por culturas de Mesoamérica y Aridoamérica durante miles de años (Smith, 1967; Callen, 1967; Sánchez-Mejorada, 1982; Nabham, 1990; Felger y Moser, 1991) La evidencia del conocimiento y uso del nopal por los primeros pobladores mexicanos se encuentra en las excavaciones de Tamaulipas y Tehuacán, Puebla, donde se encontraron semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal fosilizadas cuya antigüedad es de siete mil años, algunas de ellas pudieron haberse cultivado hacia el 500 D.C. (Callen, 1967; Smith, 1967; Flores-Valdez, 2003).

La importancia ecológica del nopal se observa en la diversidad de géneros y especies y su interrelación con la flora y fauna, así como con otros elementos de la naturaleza como el clima y el suelo. Los nopales desempeñan una importante función ecológica ya que son formadoras de suelo al mitigar los procesos de erosión (Houéroun, 1996), poseen gran capacidad de captación del rocío y almacenaje de agua, son fuente de alimento para numerosas especies animales y humanas y en sus raíces hay micorrizas y bacterias nitrificantes asociadas (Scheinvar *et al.*, en prensa).

La importancia económica y social del cultivo del nopal en México radica sobre todo en la gran superficie ocupada por nopaleras tanto silvestres como cultivadas (Tabla 4), en el tipo y número de productores involucrados, en el tipo de regiones en que se cultiva nopal y en la diversidad de los productos generados (Flores-Valdez *et al.*, 1995).

Como resultado de la posible utilización del nopal en varios productos en el mercado mundial, el interés económico en el género *Opuntia* se ha incrementado considerablemente al igual que la zona donde se cultiva (Reynolds y Arias, 2001; Sepulveda *et al.*, 2006).

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 EL NOPAL

#### 2.1.1 GENERALIDADES

El nopal es el nombre común de las cactáceas del género *Opuntia* (L) Miller, por sus características morfológicas se considera un vegetal de zonas áridas y semiáridas, varios autores así lo han descrito (Bravo, 1978; Pimienta, 1990; Granados y Castañeda, 1991; Sudzuki *et al.*, 1993; Sudzuki, 1999; Scheinvar, 1999; Barbera *et al.*, 1999; Nobel y Bobich, 2002).

Las cactáceas son endémicas del continente Americano, y México es considerado un centro de biodiversidad por excelencia, ya que de las cerca de 200 especies que existen en el mundo, de entre 83 a 105 se encuentran en este país (Chávez-Moreno *et al.*, 2009).

La clasificación taxonómica del nopal se muestra en la Tabla 1. Así como también las especies a trabajar en el presente proyecto de investigación.

**Tabla 1. Clasificación taxonómica de las especies de *Opuntia* en estudio.**

<b>Reino:</b>	<b>Vegetal</b>
Subreino:	Embryophyta
División:	Angiosperma
Clase:	Dicotiledoneae
Subclase:	Dialipetalas
Orden:	<i>Opuntiales</i>
Familia:	Cactaceae
Tribu:	<i>Opuntiae</i>
Subfamilia:	Opuntioideae
Género :	<i>Opuntia</i> (L.) Miller
Subgénero:	Platy <i>Opuntia</i>
Especie:	<i>O. atropes</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. joconostle</i> , <i>O. streptacantha</i> y <i>O. tomentosa</i>

Fuente: Bravo-Hollis, 1978.

El nopal es una planta arbustiva perteneciente a la familia de las cactáceas arbóreas, pueden alcanzar de 3 a 5 metros de altura. Los nopales se conforman por una serie de paletas carnosas llamados cladodios de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor, los cladodios están erizados de espinas, hasta de 5 mm de largo (Sáenz *et al.*, 2007).

El fruto es una falsa baya con ovario ínfero simple y carnoso. La forma y tamaño de los frutos es variable. Chessa y Nieddu (1997) y Ochoa (2003) describen en detalle los tipos de frutos; los hay ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos. Los colores son diversos: hay frutos rojos, anaranjados, púrpuras, amarillos y verdes, con pulpas también de los mismos colores. La epidermis de los frutos es similar a la del cladodio, incluso con aréolas y abundantes glóquidas y espinas, que a diferencia del cladodio, persisten aún después de la sobre madurez del fruto. La cáscara de los frutos difiere mucho en grosor, siendo también variable la cantidad de pulpa. Esta última presenta numerosas semillas, que se consumen junto con la pulpa. Hay frutos que presentan semillas abortadas, lo que aumenta la proporción de pulpa comestible. Debido a que existen preferencias en algunos mercados por frutos con pocas semillas o sin semillas, el mejoramiento genético está orientado hacia la búsqueda y multiplicación de variedades que presenten esta característica (Mondragón-Jacobo, 2004; Sáenz *et al.*, 2006).

Las características de las plantas que las hacen adaptables al medio árido tienen relación con la conformación de varios de sus órganos. Según Nobel (1998) sus raíces superficiales y extendidas captan el agua de las escasas lluvias que caen en esos ambientes.

Los cladodios, por su parte tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitos, y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos. En la Tabla 2 se observan la variación en la composición de los cladodios de distintas edades (Sáenz *et al.*, 2006, citado por: Abraján, 2008; Valdez *et al.*, 2008).

En la Figura 1, podemos apreciar una planta de nopal del Estado de Michoacán, México.



**Figura 1. *Opuntia tomentosa* (nopal).**

### 2.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL NOPAL

La Tabla 2 muestra la composición química del nopal fresco reportada por varios autores. Flores *et al.* (1995) en un estudio efectuado en 20 variedades de nopal y analizando tallos (suberificados), cladodios maduros (penca anual) y cladodios jóvenes (brotes), concluyen al igual que Pimienta (1990), que el contenido de proteínas es mayor en los brotes o renuevos; la fibra cruda aumenta con la edad del cladodio, llegando a 16.1 % en los tallos suberificados, pero siendo cercana a 8.0 %, en promedio, en los renuevos; este hecho también lo observó Tegegne (2002) en un ensayo efectuado en Etiopía. El contenido de cenizas no sigue la misma tendencia, ya que en este último trabajo, los renuevos presentan un contenido menor de cenizas que los tallos y pencas; dicha variación se debería a la serie de compuestos y elementos que conforman la ceniza y a la estrecha relación de estos con la química de suelos y a los complejos fenómenos de la disponibilidad de sus elementos para la planta (Bravo-Hollis, 1978). Por otra parte, el contenido de los macrocomponentes en el cladodio de nopal cambia con su edad, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 2. Análisis bromatológico de nopal fresco, reportado por varios autores (100 g de peso neto de nopal fresco).**

Concepto	<sup>1</sup> Contenido	<sup>2</sup> Contenido	<sup>3</sup> Contenido	<sup>4</sup> Contenido
Porción comestible	78.00		78.00	
Agua		88-95		91.00
Energía (Kcal)	27.00		27.00-37.00	
Proteína (g)	1.70	0.5-1.0	1.10-1.70	1.50
Grasas (g)	0.30	0.20	0.40	0.20
Carbohidratos (g)	5.60	3.0-7.0	5.60-8.80	4.50
Fibra		1.0-2.0		1.10
Cenizas		1.0-2.0		
Calcio (mg)	93.00		93.00-110.00	90.00
Hierro (mg)	1.60		0.50	
Tiamina (mg)	0.03		0.04	
Riboflavina (mg)	0.06		0.04	
Niacina (mg)	0.03		0.20	
Ascórbico (mg)	8.00		19.00	11.00

Fuentes: <sup>1</sup>Abraján (2008); Stintzing y Carle (2005); Sáenz (1995); Stintzing *et al.* (2001), citado por <sup>2</sup>Magloire-Feuang *et al.* (2006); <sup>3</sup>Villegas y de Gante (1995); <sup>4</sup>Rodríguez-Félix y Cantwell (1988).

**Tabla 3. Composición química de cladodios de distintas edades de *Opuntia ficus-indica* (%).**

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no nitrogenado
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4	2.5	1.67	14.4	17.5	63.9

Fuente: López *et al.*, 1977, citado por Sáenz *et al.*, 2006.

### 2.1.3 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y SUPERFICIE CUBIERTA DE NOPAL A NIVEL MUNDIAL

Son numerosos los países en el mundo en los que ocurren estas plantas, ya sean cultivadas o silvestres. Barbera (1999) señala que la mayor superficie se encuentra en México con cerca de 50 000 hectáreas para producción de fruta; según datos de Flores (1999) [citado por Flores-Valdez, (2003)], habría actualmente alrededor de 72 000 hectáreas para producción de fruta y 10 500 hectáreas para producción de nopalitos, sin considerar las nopaleras silvestres que ocuparían varios millones de hectáreas. Según Barbera (1999), Perú contaría con aproximadamente 35 000 hectáreas silvestres dedicadas en su mayoría a la cochinilla. En Brasil existirían cerca de 40 000 hectáreas destinadas a forraje. Italia contaría con 2 500 hectáreas para producción de fruta y Chile, cerca de 1 100 hectáreas. Así mismo se encuentran superficies menores en Argentina, Bolivia, España, (Islas Canarias), Estados Unidos de América, Israel, Jordania, Sudáfrica y Venezuela. También presenta importante distribución en el norte de África (Argelia, Egipto, Libia, Marruecos y Túnez, entre otros) (Selmi *et al.*, 2002).

Dada la alta dispersión de estas especies, las estadísticas oficiales son escasas y no está disponible la información sobre la superficie plantada de nopales y sus destinos: tuna, nopalito, forraje o producción de cochinilla. (Sáenz *et al.*, 2006).

México es el país donde existe la más amplia diversidad de nopales, tanto silvestres como cultivados, lo cual se manifiesta en un gran número de variedades de nopalitos y tunas en el mercado (Instituto Nacional de Ecología, 2007; Sáenz *et al.*, 2006).

En la Tabla 4 se muestra la superficie de nopal en México, destinada a siembra, cosecha y el rendimiento por hectárea para el año 2009. Como podemos ver con una superficie sembrada de 83,366.79 hectáreas, los rendimientos tanto de nopal forrajero, de nopalitos, así como tuna son bajos. Esto se podría remediar dando un aprovechamiento integral del nopal mediante su utilización agroindustrial (Sáenz *et al.*, 2006).

**Tabla 4. Superficie cultivada con nopal en México.**

<b>Cultivo</b>	<b>Superficie Sembrada(Ha)</b>	<b>Superficie Cosechada(Ha)</b>	<b>Producción (Ton)</b>	<b>Rendimiento (Ton/Ha)</b>
<b>Nopal forrajero</b>	18,084.75	4,529.75	118,286.78	26.11
<b>Nopalitos</b>	11,978.23	11,746.50	744,250.41	63.36
<b>Tuna</b>	53,303.81	46,343.56	344,077.88	7.42
<b>Total</b>	83,366.79	62,619.81	1,206,615.07	96.89

Fuente: Elaborado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA (2009).

Las principales zonas de producción del país se localizan en nueve estados de la República que son: Aguascalientes, Baja California, Distrito Federal, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí y Zacatecas. El área de producción más importante es el Distrito Federal, específicamente la región de Milpa Alta, la cual ocupa el 68% de la superficie y el 80% del volumen de la producción nacional, siguiéndole en orden de importancia San Luis Potosí, con el 8% y Oaxaca, con el 4%. Estas tres entidades junto con Michoacán y Jalisco, representan el 98% de la producción total (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

Por otro lado, las poblaciones silvestres de nopal se localizan prácticamente en la mayoría de las condiciones ecológicas del país, con variaciones de temperatura y precipitación pluvial bastante marcada (Alcántara-Hernández, 2008; ASERCA 1995). El nopal silvestre ocupa alrededor de 3 millones de hectáreas del territorio nacional (Anaya-Pérez y Bautista-Zane, 2008; ASERCA, 1995; Flores-Valdez *et al.*, 1995).

#### 2.1.3.1 Superficie cultivada con nopal verdura en el estado de Michoacán

En el estado de Michoacán existen poblaciones de nopales cultivados y silvestres. Los nopales cultivados en 2009 ocuparon una superficie de 308 ha (SIAP, 2009). Podríamos decir que la población total de nopales en Michoacán no está concentrada en un sólo lugar sino que se expande por todo el estado y las principales especies cultivadas son *O. atropes* y *O. tomentosa* (Ríos, 2004).

Algunas de las especies presentes de forma silvestre son: *O. atropes*, *O. tomentosa*, *O. robusta*, *O. fuliginosa*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. jaliscana* (Bravo-Hollis, 1978).

#### 2.1.4 APLICACIONES Y USOS DEL NOPAL

Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante.

Entre ellas se encuentran, como especies cultivadas para producción de fruta: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xoconostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Como especies silvestres: *Opuntia hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. robusta*. De las especies citadas, la más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*; es más, en la cuenca del Mediterráneo es la única *Opuntia* que se cultiva (Uzun, 1996 citado por Sáenz *et al.*, 2006; Casas y Barbera, 2002) y se emplea con diferentes propósitos.

En el año 2005 había en México 276 agroindustrias del nopal, de las cuales 26 % producían artículos medicinales, 17 % nopalitos en escabeche, 14 % nopalitos en salmuera y 12 % cosméticos. De estas empresas 26 % estaban en el Distrito Federal, 14 % en el estado de México y 9 % en Zacatecas. La mayoría de las empresas son de tipo semiartesanal, su capacidad utilizada es muy inferior a la instalada (Callejas-Juárez *et al.*, 2009).

En México el nopal en fresco es considerado como la base para la elaboración de 650 platillos diferentes (SIAP, 2009).

En la Tabla 5 podemos observar como el nopal genera una gran variedad de productos alimenticios.

**Tabla 5. Productos alimenticios, subproductos y aditivos obtenidos de las tunas y los cladodios.**

Productos		Subproductos
Tunas	Cladodios	Tunas y cladodios
Jugos y néctares	Jugos	Aceite de semillas
Mermeladas, geles y jaleas	Encurtidos y salmueras	Mucílagos de cladodios.
Fruta y láminas deshidratadas	Mermeladas y jaleas	Pigmentos de la cáscara y frutos
Edulcorantes	Harinas	Fibra dietaria de los cladodios
Alcoholes, vinos y vinagres	Alcohol	Pasta forrajera de cascara y semillas
Fruta enlatada	Confites	
Fruta y pulpa congelada	Salsas	
	Nopalitos	

Fuentes: Sáenz (2000); Corrales y Flores (2003).

En la actualidad los productos naturales están siendo estudiados por sus propiedades funcionales, entre ellos el nopal. Los compuestos funcionales son aquellos que tienen efectos beneficiosos para la salud y tanto los frutos como los cladodios de la tuna son una fuente interesante de tales componentes, entre los que destacan la fibra, los hidrocoloides (mucílagos), los pigmentos (betalaínas y carotenoides), los minerales (calcio, potasio), y algunas vitaminas como la vitamina C, buscada entre otros motivos, por sus propiedades antioxidantes; todos estos compuestos son muy apreciados desde el punto de vista de una dieta saludable y también como ingredientes para el diseño de nuevos alimentos (Sáenz, 2004).

Actualmente, la tendencia general, de los profesionales de la salud como de la población común, es buscar un buen aporte de nutrientes y que los alimentos sean beneficiosos para la salud (Murray, 2000; Sáenz, 2004; Magloire-Feuang *et al.*, 2006). De acuerdo a varios estudios, por sus compuestos, el nopal (*Opuntia spp.*) parece ser un excelente candidato a la inclusión en los alimentos (Magloire-Feuang *et al.*, 2006) por los beneficios que da su consumo (Tabla 6).

**Tabla 6. Propiedades del nopal (*Opuntia* spp.) con aplicación farmacéutica**

<b>Parte de Nopal</b>	<b>Efecto y/o Propiedades</b>	<b>Referencias</b>
<b>Tuna y cladodios</b>	Anti-cancerígeno. Inhibe la proliferación de líneas de células cancerígenas de cuello uterino, ovario, vejiga y colon	Steinmetz y Potter (1996) Murray (2000) Zou <i>et al.</i> (2005) Álvarez <i>et al.</i> (2007)
<b>Tuna y cladodios</b>	Antioxidante	Gentile <i>et al.</i> (2004) Tesoriere <i>et al.</i> (2004,2005) Valdez <i>et al.</i> (2008)
<b>Tuna, cladodios y semillas</b>	Anti- Diabético	Ibanez-Camacho y Román-Ramos (1979) Ibanez-Camacho <i>et al.</i> (1983) Frati-Munari <i>et al.</i> (1988) Frati, Jiménez y Ariza (1990) Sloan, (1994) Domínguez-López (1995) Trejo-González <i>et al.</i> (1996) Grijspardt-Vink, (1996) Hollingsworth, (1996) Cicero <i>et al.</i> (2004) Ennouri <i>et al.</i> (2005)
<b>Tuna, cladodios y tallo</b>	Anti- inflamatorio	Park <i>et al.</i> (1998) Loro <i>et al.</i> (1999) Galati <i>et al.</i> (2001)
<b>Cladodios</b>	Anti- Obesidad	Sloan (1994) Grijspardt-Vink (1996) Hollingsworth, (1996)
<b>Cladodios y tuna</b>	Reducción de niveles de colesterol	Fernández <i>et al.</i> (1992) Frati (1992) Sloan (1994) Grijspardt-Vink, (1996) Hollingsworth, (1996) Gurbachan y Felker, (1998) Jones <i>et al.</i> (2000) Stintzing <i>et al.</i> (2001) Galati <i>et al.</i> (2003) Stintzing y Carle (2005)
<b>Tallo</b>	Anti- Viral	Ahmad <i>et al.</i> (1996)
<b>Cladodios, Tuna y Flor</b>	Tratamiento contra úlceras gástricas	Murray (2000) Lee <i>et al.</i> (2001) Lee <i>et al.</i> (2002) Vázquez-Ramírez <i>et al.</i> (2006)
<b>Cladodios, Tuna y Flor</b>	Actividad Diurética	Galati <i>et al.</i> (2002)
<b>Cladodios y Tuna</b>	Alivio de los efectos hacia síntomas de la resaca de alcohol	Dok-Go <i>et al.</i> (2003) Wiese <i>et al.</i> (2004)
<b>Flor</b>	Efecto inhibitorio sobre hiperplasia benigna de próstata	Jonas <i>et al.</i> (1998)
<b>Cladodios, Tuna y Flor</b>	Alergias	Lee <i>et al.</i> (2000) Yoon <i>et al.</i> (2004)

A continuación se mencionan una serie de sectores industriales que pueden obtener y/o beneficiarse con productos obtenidos a partir de los nopales:

- **Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano:** producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopalitos.
- **Agroindustria de alimentos para animales:** suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y las semillas.
- **Industria farmacéutica:** protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de nopal en polvo.
- **Industria cosmética:** cremas, champús, lociones de cladodios.
- **Industria de suplementos alimenticios:** fibra y harinas de cladodios.
- **Industria productora de aditivos naturales:** gomas de cladodios, colorantes de la fruta, espesantes, emulsificantes, gelificantes.
- **Sector de la construcción:** compuestos ligantes de los cladodios.
- **Sector energético:** producción de biogás a partir de las pencas.
- **Sector productor de insumos para la agricultura:** productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos.
- **Sector turismo:** artesanías en base a cladodios lignificados.
- **Industria textil:** uso de colorantes naturales como el carmín de cochinilla.

(Sáenz *et al.*, 2006, citado por Valdez *et al.*, 2008).

Uno de los sectores industriales más activos actualmente es el de los aditivos naturales. Desde hace algunos años se observa un renovado interés por los productos naturales para la alimentación humana; todo lo natural es especialmente cotizado, ya que se asocia, casi inseparablemente, a inocuo, seguro y sano, aunque no siempre sea necesariamente así. Por estos motivos, las empresas productoras de aditivos se encuentran en una búsqueda constante de aditivos naturales para su aplicación tanto en alimentos como en productos farmacéuticos y cosméticos. En este sentido los nopales son conocidos desde hace siglos por ser un hospedante natural de la cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa), insecto del cual se extrae el colorante natural carmín de cochinilla, de intenso color rojo (Aquino y Bárcenas, 1999; Sáenz *et al.*, 2002a; Sáenz *et al.*, 2004b).

Un producto que está cobrando interés desde el punto de la investigación médica y que también podría tenerlo para el sector industrial, son los hidrocoloides o mucílagos que se pueden extraer de las pencas y de las cáscaras de los frutos de los nopales (Sáenz *et al.*, 2006).

## 2.2 MUCÍLAGO DE NOPAL

### 2.2.1 GENERALIDADES

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.*, 1998). El mucílago está presente como su sal de calcio en las células de mucílago del parénquima de la penca (Trachtenberg y 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 polisacárido de alto peso molecular muy ramificado que se comporta como un polielectrolito con una estructura de hasta 30, 000 diferentes azúcares (McGarvie y Parolis, 1981; Medina-Torres *et al.*, 2000, 2003; Goycoolea y Cárdenas, 2004; Matsuhiro *et al.*, 2006), su peso molecular oscila alrededor de  $13 \times 10^6$  g/mol y está compuesto por polisacáridos emparentados con las pectinas (Ruiz y Guerrero, 2009).

La composición química del mucílago de nopal ha sido objeto de diversos estudios (Matsuhiro *et al.*, 2005), tal como se muestra en la Tabla 7 elaborada por (Abraján, 2008); se pueden observar los monómeros presentes en el mucílago de diferentes especies de *Opuntia* así como su peso molecular, según distintas referencias bibliográficas consultadas.

**Tabla 7. Peso molecular (PM) y monómeros (galactosa, ramnosa, arabinosa, xilosa, ácido galacturónico) presentes en mucílago de *Opuntia* spp.**

<b>Autor</b>	<b>PM</b>	<b>Gal</b>	<b>Ram</b>	<b>Ara</b>	<b>Xil</b>	<b>Uro</b>
Srivastava (1974)*		+		+		
Saag (1975)*		+	+	+	+	+
Paulsen (1979)		+	+	+	+	+
McGarvie (1979b)		+	+	+	+	+
Trachtenberg (1981)	4.3 x 10 <sup>6</sup>	+	+	+	+	+
McGarvie (1979a)		+		+	+	
McGarvie (1981)		+	+	+	+	+
Trachtenberg (1982)	1.56 x 10 <sup>6</sup>					
Nobel (1992)		+	+	+	+	+
Sáenz (1993)		+	+	+	+	+
Forni (1994)		+		+	+	+
Cárdenas (1997)	3 x 10 <sup>6</sup>					
Medina (2000)	2.3 x 10 <sup>6</sup>	+	+	+	+	+
Cárdenas (2008)		+	+	+	+	
Majdoub (2001a)	6.92 x 10 <sup>6</sup>	+	+	+	+	+
Majdoub (2001a)	2.25 x 10 <sup>5</sup>		+			+
Majdoub (2001b)	13.3 x 10 <sup>6</sup>	+	+	+	+	+
Habibi (2004)		+	+	+	+	+

PM: Peso molecular, Gal: Galactosa, Ram: Ramnosa, Ara: Arabinosa, Xil: Xilosa, Uro: Ácido galacturónico.

\*Citados por Sáenz *et al.* (2006).

Fuente: Abraján, (2008).

Entre los monómeros contenidos en la cadena se encuentran: aproximadamente 47% de arabinosa, 23% de xilosa, 18% de galactosa, 7% de ramnosa y 5% de ácido galacturónico, respecto a su peso molecular (Arizmendi, 2004,) estas proporciones pueden variar de acuerdo a diversos factores como: variedad de nopal, edad, condiciones ambientales y estructura empleada para la extracción (sea fruto, cáscara o cladodio), entre otros factores (Abraján, 2008).

## 2.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO

En la Tabla 8 se pueden observar los valores promedio del porcentaje en peso de los diferentes macrocomponentes del mucílago de nopal usando diferentes procesos de extracción.

**Tabla 8. Composición química del mucílago de *Opuntia ficus-indica* reportada en diferentes procesos de extracción.**

Porcentaje	Escaldado	Entero	Decolorado	Cocido
Carbohidratos	72.9±1.7a	68.9±0.9b	72.6±0.0a	74.8±0.1c
Fibra cruda	0.6±0.1ab	1.3±0.6 <sup>a</sup>	0.1±0.0b	0.1±0.0b
Proteínas	4.0±0.3a	3.±0.1b	3.7±0.0a	3.9±0.1a
Grasa	0.6±0.1a	0.9±0.0b	0.8±0.0b	0.7±0.0a
Cenizas	21.9±1.8a	25.9±0.7b	22.8±0.1ab	20.5±0.2a

Letras iguales en la misma fila indican grupos homogéneos ( $\alpha \geq 0.05$ ) establecido por ANOVA.

Fuente: Abraján, (2008).

## 2.2.3 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 flocculan.

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).

Desde hace siglos se conocen otros usos del mucílago del nopal. Un ejemplo es la utilización de las pencas en la clarificación de aguas (López, 2000), su adición a la cal como adherente de la pintura (Ramsey, 1999) o su introducción en el suelo para aumentar la infiltración de agua (Gardiner *et al.*, 1999).

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 y 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).

#### 2.2.4 BENEFICIOS DEL CONSUMO DE MUCÍLAGO

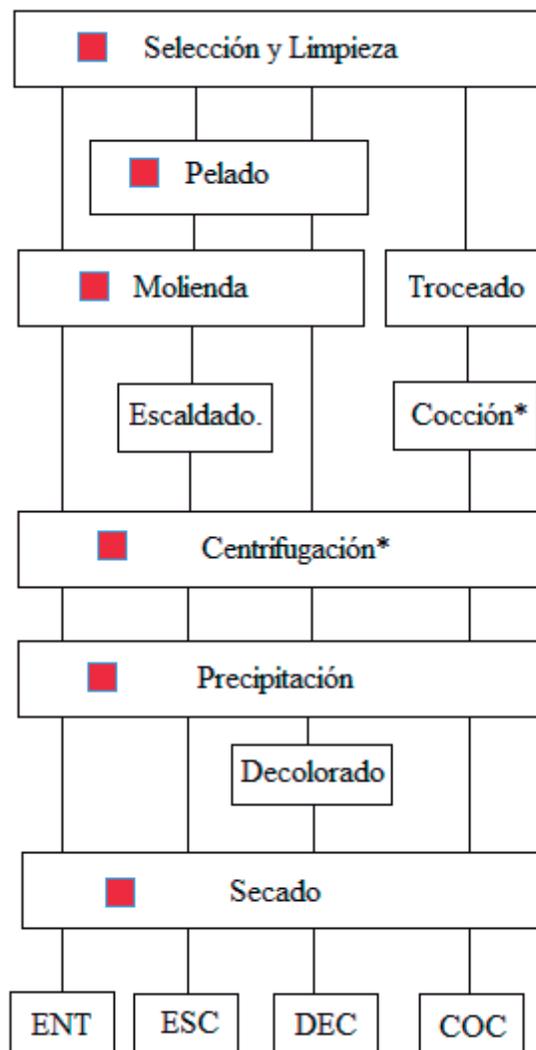
Los mucílagos están siendo de gran interés para la investigación médica (Tabla 6) por sus propiedades funcionales; ayudan al buen funcionamiento del intestino, a la asimilación de grasas, colesterol, glucosa y sustancias biliares, cumpliendo un papel en la prevención y el tratamiento de enfermedades crónico degenerativas como son los desórdenes gastrointestinales, obesidad, enfermedad coronaria, diabetes y cáncer de colon (Álvarez *et al.*, 2007).

Los mucílagos impiden el exceso de ácidos gástricos y protegen la mucosa del tracto digestivo. Vázquez-Ramírez y colaboradores (2006) señalan que el mucílago de nopal acelera la restauración de la mucosa gástrica en los casos de gastritis alcohólica provocada en ratas.

También se han evaluado los efectos del mucílago para el alivio de piel irritada. Se observó que la aplicación cutánea de los mucílagos indujo la reparación del tejido lesionado, acelerando la fase de reepitelización (Trombetta *et al.*, 2006; Park y Chun, 2001).

#### 2.2.5 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, 2008; Rodríguez, 2010) únicamente varían las condiciones de cada una de las etapas del proceso. A continuación (Figura 2) se muestra el diagrama de flujo propuesto por Abraján, (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.



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

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

Fuente: Abraján, 2008.

**Figura 2. Diagrama de bloques de los diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal.**

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos por diferentes autores que han reportado los rendimientos de mucílago de nopal según su proceso de extracción.

**Tabla 9. Rendimientos de extracción de mucílago de nopal fresco (*Opuntia* spp.)**

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

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).

### **2.3 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS**

Las estaciones son los períodos del año en los que las condiciones climatológicas imperantes se mantienen, en una determinada región, dentro de un cierto rango. Estos periodos duran aproximadamente tres meses y se denominan invierno, primavera, verano y otoño, aunque en las regiones de la tierra cercanas al ecuador las estaciones son sólo dos, la estación seca y la lluviosa ya que en ellas varía drásticamente el régimen de lluvias, pero no así la temperatura. El 21 de marzo, fecha del equinoccio de primavera, el Sol sale por el Este y se pone por el Oeste. Al pasar los días, estos puntos van corriéndose hacia el norte, primero rápidamente, luego lentamente, hasta el 21 de junio, fecha del solsticio de verano, en que el Sol alcanza su máxima altura. A partir del 21 de junio, los puntos se alejan del Norte y se van acercando al este y al oeste, cuyas posiciones vuelven a ocupar el 22 o 23 de septiembre, equinoccio de otoño. Luego se acercan al punto sur, hasta el 22 de diciembre, solsticio de invierno, del cual se alejan después. Transcurrido un año, vuelven a coincidir con los puntos este u oeste (Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, 2010).

### 3. JUSTIFICACIÓN

México es el país donde existe la más amplia diversidad de nopales, tanto silvestres como cultivados, lo cual se manifiesta en un gran número de variedades de nopalitos y tunas en el mercado (Sáenz *et al.*, 2006; Instituto Nacional de Ecología, 2007).

El nopal silvestre ocupa alrededor de 3 millones de hectáreas del territorio nacional (Flores-Valdez *et al.*, 1995; ASERCA, 1995; Anaya-Pérez y Bautista-Zane, 2008).

Aunque se conocen alrededor de 200 especies del género *Opuntia* y México cuenta con aproximadamente 105 (Chávez-Moreno *et al.*, 2009), sólo 10 o 12 especies hasta ahora han sido utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopales para alimentación humana, forraje o como sustrato para la producción de cochinilla para obtención de colorante. La especie más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*; en la cuenca del Mediterráneo es la única *Opuntia* que se cultiva (Uzun, 1996; Casas y Barbera, 2002; Saenz *et al.*, 2006).

En el estado de Michoacán existen poblaciones de nopales cultivados y silvestres. Los nopales cultivados en 2009 ocuparon una superficie de 308 ha (SIAP, 2009), mientras que con respecto al nopal silvestre no hay registros, pero se sabe que ocupan gran parte del territorio Michoacano. Entre las especies silvestres se han reportado: *Opuntia atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* (Bravo-Hollis, 1978); especies poco estudiadas que representan un gran potencial para su estudio ya que traería consigo grandes beneficios tecnológicos, económicos, sociales y culturales (Sáenz *et al.*, 2006).

Las diferentes especies de nopales tienen características comunes y a la vez distintas. Su capacidad para resistir altas temperaturas y períodos prolongados de sequía las hace especialmente atractivas para su crecimiento en las zonas áridas y semiáridas, con requerimientos agronómicos bajos, además de todas sus bondades para con la salud del que lo consume, hace que los nopales sean de gran interés para su industrialización.

Últimamente, la tendencia general en el consumo de alimentos es buscar un buen aporte de nutrientes y que además los alimentos sean beneficiosos para la salud. Se ha encontrado abundante fibra soluble del nopal representada por el mucílago, hidrocoloide que contribuye al buen funcionamiento del intestino, asimilando grasas, colesterol, glucosa y sustancias biliares, cumpliendo un papel en la prevención y tratamiento de problemas

gastrointestinales, obesidad, enfermedades coronarias, diabetes y cáncer de colon, propiedades que han sido de gran interés para la industria farmacéutica (Murray, 2000).

Además, la industria alimenticia se ha interesado mucho en este hidrocoloide ya que cada vez más están siendo cotizados los aditivos naturales, a este respecto el mucílago del nopal posee diferentes e interesantes propiedades como: agente espesante, su gran capacidad de adsorción de agua, de formar geles, como reemplazante de grasas en diversos alimentos, ligante de sabor, agente emulsificante, mejorador de la textura, controla la cristalización, estabiliza suspensiones, inhibe la sinéresis y puede usarse para obtener películas comestibles (Abraján, 2008).

Todas las valiosas y atractivas propiedades del mucílago de nopal y los resultados interesantes que hay hasta ahora por diferentes autores, podrían ser aprovechadas al máximo si se mejoran los rendimientos de extracción del mucílago de nopal.

## **4. HIPÓTESIS**

Mediante la optimización de la metodología de extracción de mucílago del nopal de especies silvestres del estado de Michoacán, modificando condiciones de extracción se obtendrán mayores rendimientos de este polisacárido, lo que permitirá reconocer el valor de estas especies como fuente de mucílago así como establecer una alternativa para su industrialización en esta Entidad.

## 5. OBJETIVOS

### GENERAL

Seleccionar y optimizar la metodología para la extracción de mucílago de nopal de cinco especies de *Opuntia* del estado de Michoacán: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.

### PARTICULARES

1. Localizar y georreferir las poblaciones silvestres de cinco especies de *Opuntia* del estado de Michoacán (*O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa*).
2. Realizar la caracterización morfológica básica de cinco especies de *Opuntia* del estado de Michoacán.
3. Realizar la caracterización química de las diferentes especies de *Opuntia* estudiadas; determinando humedad, extracto etéreo, cenizas, carbohidratos totales, por los métodos de la AACC (2000), proteínas por el método de Kjeldhal y fibra soluble, insoluble y dietética total por el método de Prosky *et al.* (1988).
4. Comparar el método optimizado de extracción de mucílago de nopal de cinco especies de *Opuntia* de Michoacán con el método de Forni *et al.* (1994) modificado por Rodríguez (2010), determinando el nivel de mejora, medido en términos de rendimiento en porcentaje.
5. Comparar los rendimientos de mucílago obtenidos de las cinco especies de *Opuntia* de Michoacán a fin de seleccionar la especie(s) que brinde el mayor rendimiento, y sirva para su explotación a gran escala.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 MATERIA PRIMA

Cladodios de cinco especies silvestres de *Opuntia* de Michoacán a saber: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*, fueron recolectadas del estado de Michoacán de edad aproximada de entre 2 a 3 años, sanos y libres de plagas, para su análisis en las diferentes etapas de la metodología descrita a continuación.

### 6.2 BÚSQUEDA Y LOCALIZACIÓN GEORREFERIDA DE POBLACIONES SILVESTRES DE ESPECIES DE *OPUNTIA* EN MICHOACÁN

La búsqueda e identificación de las especies se llevó a cabo en primera instancia mediante la consulta bibliográfica y las visitas al Herbario del Instituto de Ecología, A.C., México (IE-BAJÍO), al Jardín Botánico de la UMSNH y al Jardín Botánico del Centro de Investigaciones en Ecosistemas UNAM. Aunado a lo anterior se realizaron salidas al campo, para la búsqueda, y localización de las especies en estudio. Los datos obtenidos de la(s) localidad(es), altitud (metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)) y coordenadas geográficas: latitud norte y longitud oeste (medida en grados, minutos y segundos (°, ', y '')) hacia el norte u oeste del Ecuador) donde se encuentran poblaciones de cada una de las 5 especies de *Opuntia* permitió desarrollar una base de datos.

### 6.3 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

Siete cladodios de 2 a tres años de edad de plantas de más de cinco años de cada una de las especies de *Opuntia* endémicas de Michoacán fueron seleccionados mediante un muestreo aleatorio simple en el segundo y tercer nivel de la planta contando los niveles de la copa al tronco y se recolectaron. Los caracteres cuantitativos y cualitativos seleccionados fueron los siguientes: Cuantitativos: Caracteres morfométricos básicos: largo, ancho (inferior, medio, superior) y espesor del cladodio (Bravo-Hollis, 1978 y González *et al.*, 2001).

Cualitativos: se consideraron únicamente la forma del cladodio, la forma y el color del fruto, el color de la flor, la forma de las espinas y el color de las glóquidas.

Los caracteres morfométricos fueron medidos sobre cladodios equivalentes, para cada especie y concentrados en una matriz de datos que fue analizada estadísticamente mediante técnicas multivariadas, análisis de la varianza (ANOVA). Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey (Steel y Torrie, 1980), con un nivel de confiabilidad del 95 %. El análisis de los datos se llevó a cabo con el software SAS JMP Statistical Discovery, versión 6 para Windows.

## **6.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN**

### **6.4.1 DESHIDRATADO DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN**

El nopal limpio de cada una de las cinco especies se cortó en rebanadas de 9 cm<sup>2</sup> con espesor de 2 mm (1.056 g). Las rebanadas se colocaron en hileras con una separación de 0.5 cm en charolas, teniendo 153 rebanadas por charola que representaron un área de 1980 cm<sup>2</sup>. Las charolas fueron colocadas en un deshidratador solar que se diseñó en la Facultad de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Sámamo 2011). Posteriormente el material fue pulverizado y empacado al vacío.

### **6.4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN**

La caracterización de la materia prima en seco incluyó los análisis de contenido de proteína, humedad, cenizas, extracto etéreo, carbohidratos totales (AOAC, 1990; AACC 2000), fibra dietética soluble, insoluble y total (Prosky *et al.*, 1988).

## 6.5 EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO

Para la extracción de mucílago se utilizó el método modificado por Rodríguez (2010) en base a los estudios por Forni, *et al.* (1994), y Medina-Torres *et al.* (2000).

El nopal es limpiado y desespinado, se corta en cuadros de 0.5 cm<sup>2</sup>. Es molido en licuadora en una relación nopal:agua (1:2 w/V) y calentado para extracción a una temperatura de 80 °C±2 por una hora, posterior a ello el material fue centrifugado a 3500 rpm durante 20 min (mini centrífuga Helmer Modelo: Z 400 K, capacidad de carga 300 ml). En la siguiente etapa el mucílago extraído contenido en el sobrenadante, se precipitó agregando etanol al 96 % (V/V), en una proporción 4:1 (alcohol: mucílago) y se dejó reposar a temperatura ambiente (1 día). Se recuperó el mucílago aglomerado por decantación. El líquido restante se centrifugó (3500 rpm/15 min), el precipitado en el fondo del tubo se recuperó y se colocó junto con el mucílago que se recobró por decantación. El mucílago fue finalmente secado a 45° C / 6 h en un horno de secado digital (ECOSHEL modelo: 9053).

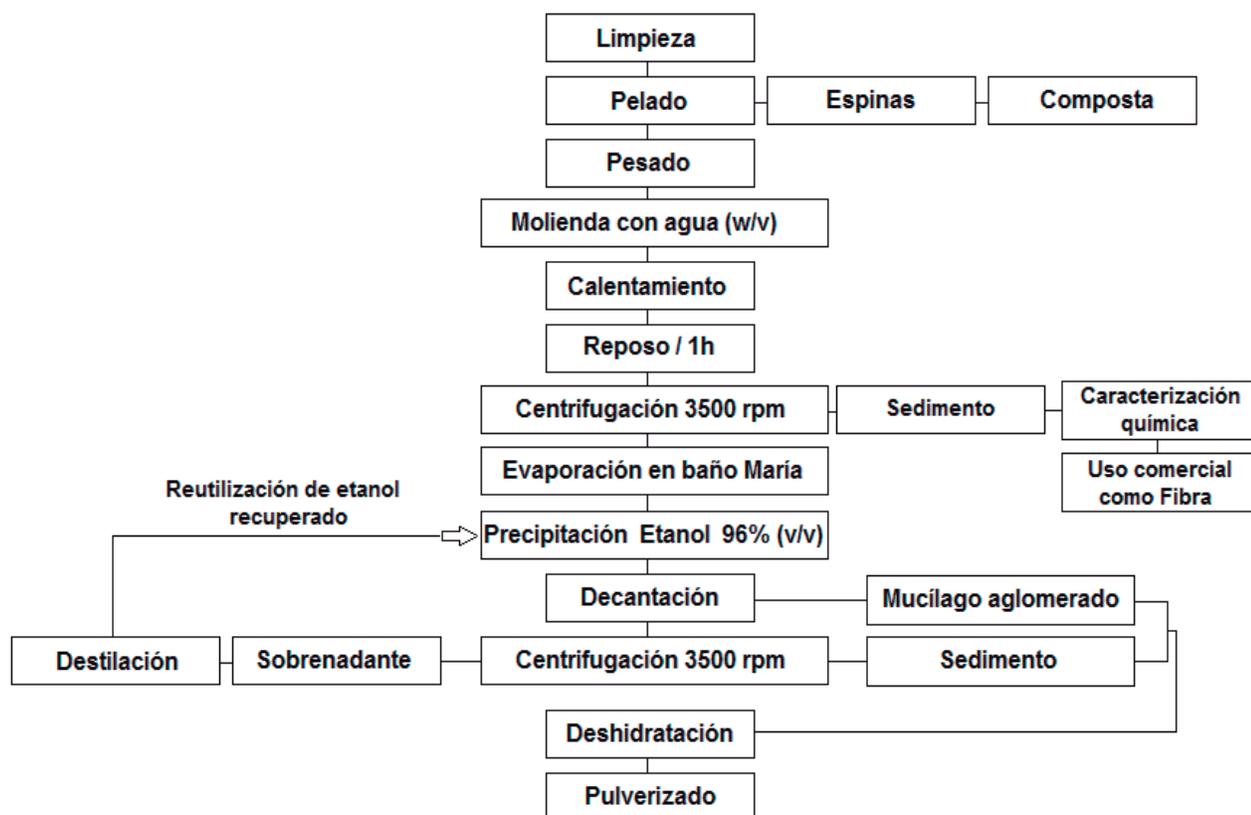


Figura 3. Metodología general propuesta para la extracción de mucílago, indicando el uso integral del nopal.

## 6.6 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Para encontrar puntos óptimos con la finalidad de mejorar el rendimiento se utilizó la metodología de superficie respuesta (MRS).

Optimizar es sinónimo de buscar lo mejor, también alcanzar la ganancia máxima o tener la pérdida mínima. La metodología de superficie respuesta (MSR) es un conjunto de técnicas estadísticas útiles para analizar problemas en los cuales una respuesta de interés está influida por diversas variables. Estos métodos se han empleado exitosamente en varias áreas de la biotecnología (Saval *et al.*, 1993).

### 6.6.1 OPTIMIZACIÓN INICIAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Para lograr un modelo real con la MSR, primeramente se definieron las variables que ejercen mayor influencia sobre la respuesta a optimizar, a saber: Relación nopal:agua (w/V), Temperatura de extracción (°C), Tiempo de extracción (h) y Tiempo de centrifugado (min) y la variable respuesta del proceso fue el rendimiento de mucílago (%).

Con base en resultados de otros autores (Sepúlveda y Sáenz, 2007; Rodríguez, 2010) se establecieron los límites del dominio experimental.

Posteriormente se seleccionó el diseño experimental, para ello se exploraron algunos diseños experimentales utilizando el paquete estadístico Statgraphics plus:

- Un diseño ortogonal compuesto (18 corridas experimentales,  $\alpha = 1.41$ ).
- Un diseño de composición central (26 corridas experimentales, 3 repeticiones en el centro).
- Y un diseño Box Behnken (27 corridas experimentales, 3 repeticiones en el centro).

Se optó por seleccionar el diseño Box Behnken debido a que este diseño se aplica cuando se tiene tres o más factores y suele ser más eficiente en cuanto al número de corridas, además es un diseño rotatable es decir, todos los puntos están a la misma distancia del centro, lo que proporciona una estimación de la varianza igual en todas direcciones. (Gutierrez y De la Vara, 2008).

Este diseño requiere tres niveles codificados (-1, 0, 1).

Los niveles codificados de los factores del diseño factorial  $2^k$  se obtuvieron aplicando la siguiente ecuación:

$$(1) \quad x_i = \frac{(A_i - \bar{A})}{D}$$

$$(2) \quad D = (A_2 - A_1) / 2$$

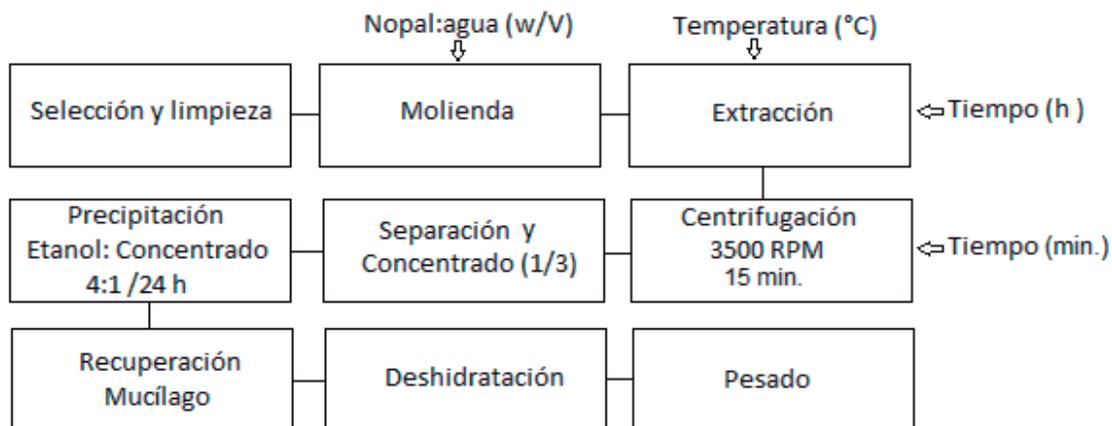
Dónde:

$A_i$  es el  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$ .

$\bar{A}$  es el nivel promedio del factor  $A$ .

Estos factores proporcionan un marco de trabajo uniforme para investigar los efectos de los factores en cualquier contexto experimental, ya que los valores reales de los niveles dependen de los factores específicos en el estudio.

A continuación, se realizó el desarrollo del experimento de acuerdo al diseño establecido que se muestra en la Figura 4, con una materia prima de 200 g de cladodios de *Opuntia tomentosa* de 2 a tres años de edad, provenientes de plantas de más de 5 años, las colectas se realizaron durante el mes de junio y julio, al término de la estación de primavera y a comienzos del verano. Los cladodios de junio y julio se caracterizaron por estar deshidratados, mostrando las enervaduras. Los cladodios colectados a principios del verano eran cladodios bien hidratados y carnosos.



**Figura 4. Diagrama de operaciones para la extracción de mucílago de nopal, optimización inicial.**

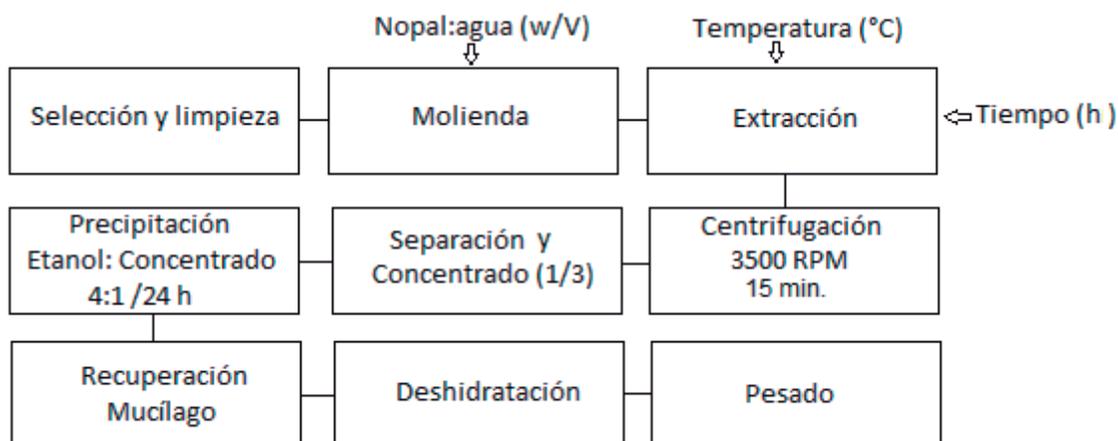
En la figura 4 podemos observar las diferentes operaciones del proceso de extracción de mucílago así como las variables modificadas de acuerdo al diseño experimental. El secado se realizó en Estufa de Secado Digital Felisa Modelo: Fe-291D, a 40 °C por 24 h. Los mucílagos obtenidos fueron posteriormente pesados.

Los resultados obtenidos se ajustaron a un modelo de regresión de segundo orden con cuatro variables, empleando el paquete software SAS JMP Statistical Discovery, versión 6 para Windows, software Minitab Statistical, versión 16 y Statgraphics Plus para Windows versión 2.1.

### 6.6.2 SEGUNDA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Para la segunda optimización, se seleccionó el diseño Box Behnken, los niveles para el diseño experimental se escogieron tomando en cuenta dos factores: la primera optimización y la estación climatológica.

Los niveles codificados de los factores del diseño factorial  $2^k$  se obtuvieron aplicando la ecuación (1). Se realizó el desarrollo del experimento de acuerdo al diseño establecido, trabajando con 100 g de materia prima, de cladodios de *Opuntia tomentosa*, de 2 a tres años de edad, de plantas de más de 5 años, con colectas realizadas del 5 al 19 del mes de septiembre de 2011, durante la estación de verano (cladodios hidratados, carnosos) siguiendo las operaciones expuestas en la Figura 5.



**Figura 5. Diagrama de operaciones para la extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, segunda optimización.**

En la Figura 5 se puede observar las diferentes operaciones del proceso de extracción de mucílago, así como las tres variables modificadas de acuerdo al diseño experimental. El secado del mucílago obtenido se realizó en Horno de secado digital (ECOSHEL modelo: 9053), a una temperatura de 45 °C/6 h. Los mucílagos obtenidos fueron pesados.

Los resultados obtenidos se ajustaron a un modelo de regresión de segundo orden con tres variables, usando los paquetes estadísticos: software SAS JMP Statistical Discovery, versión 6 para Windows; software Minitab Statistical, versión 16 y Statgraphics Plus para Windows versión 2.1.

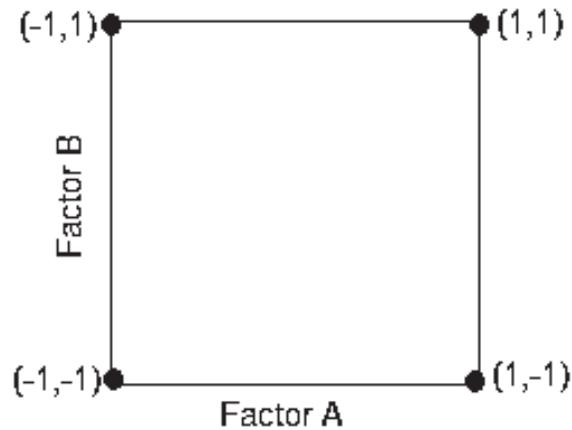
### 6.6.3 OPTIMIZACIÓN FINAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Se usó un diseño experimental que permite estudiar el efecto individual de cada una de las variables así como la interacción de estas sobre la variable respuesta.

Para el diseño experimental final en el proceso de extracción de mucílago de nopal, se tuvieron dos factores:

1. Relación nopal: agua (N:A (w/V)).
2. Temperatura de extracción (T.E. (°C)).

Por lo tanto se usó un diseño experimental factorial  $2^2$  dando como origen una matriz de cuatro corridas experimentales, que se realizaron por triplicado, con tres puntos centrales, lo cual permitió una exploración más completa. A continuación se muestra la representación geométrica del diseño en la Figura 6.



**Figura 6. Representación del diseño factorial  $2^2$ .**

Posteriormente se realizó el desarrollo del experimento de acuerdo al diseño establecido, trabajando con 100 g de materia prima, de cladodios de *Opuntia tomentosa*, de 2 a tres años de edad, provenientes de plantas de más de 5 años, colectadas del 23 de octubre al 14 noviembre de 2011, durante la estación de otoño (cladodios hidratados, carnosos) siguiendo las operaciones expuestas en la Figura 5.

Con los resultados se ajustó un modelo de regresión lineal de primer orden con dos variables, el modelo se ajustó empleando los paquetes estadísticos: software SAS JMP Statistical Discovery, versión 6 para Windows; software Minitab Statistical, versión 16 y Statgraphics Plus para Windows versión 2.1

### **6.7 COMPARACIÓN MEDIDA EN % DE RENDIMIENTO DE MUCÍLAGO ENTRE EL MÉTODO OPTIMIZADO Y EL INICIAL**

El método optimizado de extracción de mucílago de nopal de cinco especies de *Opuntia* de Michoacán fue comparado con el método de Forni *et al.* (1994) modificado por Rodríguez (2010), determinando el nivel de mejora, medido en porcentaje de rendimiento. Para ello, se trabajó con 100 g de materia prima, cladodios de *Opuntia tomentosa* de 2 a tres años de edad, de plantas de más de 5 años, con colectas de nopal realizadas durante febrero de 2012.

Se realizó la extracción del mucílago de nopal de las especies *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* por triplicado, de acuerdo a las condiciones establecidas en el método inicial y el optimizado. Los datos obtenidos fueron concentrados en una matriz, analizada estadísticamente usando el software SAS JMP Statistical Discovery. Para ello, primero se comprobó que los datos obtenidos de cada método se ajustaran a una distribución normal mediante la prueba de Shapiro-Wilk, posteriormente se realizó un análisis de la varianza (ANOVA).

Finalmente, para expresar el nivel de mejora del método optimizado con respecto al método inicial medido únicamente por el porcentaje de rendimiento de mucílago, se utilizó la Ecuación 3.

$$(3) \quad \% \text{ Nivel de mejora} = \left( \frac{R_o}{R_i} \times 100 \right) - 100$$

Donde:  $R_o$ = Rendimiento obtenido con método optimizado de extracción.

$R_i$ = Rendimiento obtenido con el método inicial de extracción.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 BÚSQUEDA Y LOCALIZACIÓN GEORREFERIDA DE POBLACIONES SILVESTRES DE ESPECIES DE *OPUNTIA*

Cinco especies de *Opuntia* con distribución geográfica en Michoacán: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha* y *O. tomentosa*, fueron localizadas, georreferidas y registradas como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10. Distribución de las especies *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* en Michoacán.**

Especie	Municipio	Localidad	Altitud (m.s.n.m.)	Latitud Norte	Longitud Oeste
<i>O. atropes</i>	Morelia	<sup>1</sup> Camino hacia el rancho las Flores	2224	19° 42' 56''	101° 16' 17''
	Morelia	<sup>2</sup> Lado noreste del Cerro del Águila, subiendo al poblado de San Nicolás de Obispo	2370	19° 37' 50''	101° 20' 00''
<i>O. hyptiacantha</i>	Cuto del Porvenir	<sup>1</sup> Carretera Morelia-Cuto del Porvenir	1949	19° 50' 18''	101° 9' 43''
<i>O. joconostle</i>	Cuto del Porvenir	<sup>1</sup> Carretera Morelia-Cuto del Porvenir	1949	19° 50' 18''	101° 9' 43''
<i>O. streptacantha</i>	Morelia	<sup>1</sup> Morelia. Ciudad jardín	2177	19° 42' 57''	101° 15' 51''
	Cuto del Porvenir	<sup>1</sup> Carretera Morelia-Cuto del Porvenir	1949	19° 50' 18''	101° 9' 43''
<i>O. tomentosa</i>	Morelia	<sup>1</sup> Camino hacia el rancho Flores	2224	19° 42' 56''	101° 16' 17''
	Morelia	<sup>2</sup> Lado noreste del Cerro del Águila.	2315	19° 38' 07''	101° 20' 18''
	Tiripetío	<sup>1</sup> Entrada a Tiripetío	2017	19° 32' 36''	101° 20' 40''

<sup>1</sup>Datos obtenidos al realizar búsqueda de sitios de colecta. <sup>2</sup> Cortesía del Herbario del Instituto de Ecología, A.C., México (IE-BAJÍO).

A)



B)



C)



D)



E)



**Figura 7. Fotografías de cinco especies de *Opuntia* de Michoacán, en campo. A) *O. atropes*, B) *O. hyptiacantha*, C) *O. joconostle*, D) *O. streptacantha* y E) *O. tomentosa*.**

## 7.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

En la Figura 8 podemos observar uno de los cladodios colectados para su análisis morfológico.



**Figuras 8. Colecta de nopales.**

Los caracteres morfométricos medidos para cada especie están concentrados en la Tabla 11. El análisis multivariado permitió confirmar que la distribución de los datos fue normal, presentando una densidad de datos con forma elíptica. Cabe señalar la ausencia de datos aberrantes, corroborado por distancias de Mahalanobis. Los caracteres morfométricos fueron analizados mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP), que confirmó que las variables en conjunto ejercen influencia para definir a cada una de las especies. A partir del ACP se calcularon los eigenvectores de los datos morfométricos analizados, que sugieren que la variable ancho con 54.23 % tiene mayor peso en el eje de las x, el largo con 85.98% en el eje y, mientras que el espesor con 91.52 % en z. De acuerdo con el análisis univariado todas las variables fueron altamente significativas ( $F < 0.0001$ ) excepto el espesor, lo que indica que este carácter no es un atributo que permita la diferenciación entre las especies.

**Tabla 11. Valores medios de las variables morfométricas de las especies *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

Especie	Largo (cm)	Ancho (cm)			Espesor(mm)
		Inferior	Medio	Superior	
<i>O. tomentosa</i>	34.06 a	6.20 c	9.70 d	9.06 b	9.86 a
<i>O. atropes</i>	24.89 b	9.80 b	13.26 c	11.11 a	11.51 a
<i>O. hyptiacantha</i>	34.14 a	6.35 c	13.06 c	7.12 c	9.10 a
<i>O. streptacantha</i>	34.70 a	12.14 a	18.54 a	12.22 a	12.00 a
<i>O. joconostle</i>	23.76 c	10.76 b	15.77 b	11.73 a	11.43 a

Letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencia estadística en las medias, Tukey-Kramer HSD.

Los resultados de las variables cuantitativas fueron comparados con los reportados por Bravo-Hollis (1978) y González *et al.* (2001). Al comparar las variables morfométricas de largo de cladodio reportado para *Opuntia atropes*: 17-30 cm., *O. hyptiacantha*: 20 a 30 cm, *O. joconostle*: 18 a 28 cm, *O. streptacantha*: 25 a 30 cm, y *O. tomentosa*: 10-60 cm. En la Tabla 11, observamos que las especies *O. streptacantha* y *O. hyptiacantha* están fuera del rango reportado para el largo de cladodio, esto se debe a la región geográfica de colecta y condiciones de suelo.

Los atributos cualitativos fueron: forma de cladodio, forma y color de la espina y el fruto y color de flor (Tabla 12), los cuales coincidieron a los reportados por Bravo-Hollis (1978) y González *et al.* (2001).

Además, se describieron las características cuantitativas y cualitativas de la planta de cada especie de *Opuntia* registradas en la Tabla 13.

Tabla 12. Atributos cualitativos de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.

Atributo	<i>O. atropes</i>	<i>O. hyptiacantha</i>	<i>O. joconostle</i>	<i>O. streptacantha</i>	<i>O. tomentosa</i>
<b>Forma de cladodio</b>	Más largos que anchos hasta ovalados	Aplanados, oblongos hasta obovados	Aplanados, ovados a romboides	Aplanados, obovados hasta circulares	Oblongos hasta angostamente ovalados
<b>Forma y color de espina</b>	Rectas, amarillo opaco o morenas en la base, amarillas casi blancas hacia la punta	Subuladas, aplanadas en la base, divergentes, blancas	Blancas, subuladas, ligeramente torcidas	Extendidas, la mayoría adpresas, blanco a grisáceo	Amarillentas
<b>Forma y color de fruto</b>	Ovoide verde	Globosos, amarillos a purpuras	Subgloboso, amarillo	Globosos, rojos obscuro, a veces amarillentos	Ovoide rojo
<b>Color de flor</b>	Rosas o amarillas con manchas rojizas	Rojas	Amarillas	Amarillas hasta anaranjadas	Anaranjadas

**Tabla 13. Forma y altura de la planta de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

<b>Especie</b>	<b>Tipo de planta</b>
<i>O. tomentosa</i>	Arbórea 3 a 5 m de altura. Ramas abundantes formando copa amplia.
<i>O. atropes</i>	Arbustiva de 1 a 3 m de alto, muy ramificada.
<i>O. hyptiacantha</i>	Arbórea de hasta 4 m de altura, muy ramificada.
<i>O. streptacantha</i>	Arbórea de hasta 5 m de altura. Ramas abundantes formando copa amplia.
<i>O. joconostle</i>	Arbórea de hasta 5 m de altura. Ramas abundantes formando copa amplia.

**Tabla 14. Fenología de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

<b>Especie</b>	<b>Fenología</b>
<i>O. tomentosa</i>	Florece en abril, mayo y fructifica en julio, agosto.
<i>O. atropes</i>	Florece en marzo, fructifica en abril.
<i>O. hyptiacantha</i>	Florece en abril, fructifica en agosto - septiembre.
<i>O. streptacantha</i>	Florece en abril, fructifica en agosto - septiembre.
<i>O. joconostle</i>	Florece en abril a mayo fructifica en agosto - septiembre.

Observando las tablas anteriores, se deduce que para la identificación de las especies estudiadas, el parámetro cuantitativo que resulta útil para la diferenciación de especies es el ancho medio, sin embargo, para la identificación de la especie es de mayor utilidad los atributos cualitativos de forma y color de cladodio, fruto, espinas, así como la forma y la altura de la planta y la fenología de las diferentes especies de *Opuntia*.

### 7.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

#### 7.3.1 DESHIDRATADO DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

Se deshidrató 161.57 g de materia prima/ charola dando un total de 2,585.09 g de nopal por carga en el deshidratador solar. El tiempo total de deshidratación fue de 5 h en un día con una radiación solar promedio de 693.82 W/m<sup>2</sup> con una temperatura ambiente promedio de 20.6 °C y una temperatura máxima al interior del deshidratador de 51 °C.

En la Tabla 15 se muestra el rendimiento con respecto a la materia prima fresca inicial y seca. Se obtuvo material pulverizado de cada una de las especies con humedad menor al 5%.

**Tabla 15. Rendimientos en deshidratado de cladodios de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

Especie	Cladodios frescos y limpios (g)	Cladodios secos (g) pulverizados	Rendimiento de solidos (%)
<i>O. tomentosa</i>	1157.20	170.10	14.70
<i>O. atropes</i>	1355.20	151.70	11.19
<i>O. hyptiacantha</i>	1151.40	190.62	16.56
<i>O. streptacantha</i>	2006.60	260.04	12.96
<i>O. joconostle</i>	1710.90	220.95	12.91

### 7.3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CINCO ESPECIES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

Los resultados de la composición química de la materia seca en las diferentes especies de *Opuntia* se muestran en las Tablas 16 y 17.

**Tabla 16. Composición química (%) de cladodios secos de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

	<i>Opuntia atropes</i>	<i>Opuntia hyptiacantha</i>	<i>Opuntia joconostle</i>	<i>Opuntia streptacantha</i>	<i>Opuntia tomentosa</i>
<b>Humedad</b>	4.50 b	4.77 b	3.63 bc	3.07 c	6.20 a
<b>Cenizas</b>	18.06 d	22.30 b	25.33 a	21.17 c	22.9 b
<b>Lípidos</b>	1.29 b	1.21 b	1.46 b	1.94 a	1.41 b
<b>Proteínas</b>	4.89 b	4.54 b	3.12 c	6.00 a	4.17 bc
<b>E.L.N *</b>	31.56 a	2.92 d	22.82 b	21.33 b	13.05 c

Letras iguales en la misma fila indican que no hay diferencia estadística en las medias, Tukey-Kramer HSD.

\* Extracto libre de nitrógeno.

**Tabla 17. Composición de fibra dietética soluble, insoluble y total (%) de cladodios secos de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

<b>Especie</b>	<b>Fibra soluble</b>	<b>Fibra insoluble</b>	<b>Fibra dietética total</b>
<i>Opuntia atropes</i>	16.41 a	23.21 c	39.62 d
<i>Opuntia hyptiacantha</i>	14.20 ab	55.15 a	69.36 a
<i>Opuntia joconostle</i>	6.36 c	37.28 b	43.64 cd
<i>Opuntia streptacantha</i>	11.48 b	35.01 b	46.49 c
<i>Opuntia tomentosa</i>	17.61 a	34.66 b	52.27 b

Letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencia estadística en las medias, Tukey-Kramer HSD.

En las Tabla 16 y 17 podemos observar la composición química de las diferentes especies en estudio, comparando estadísticamente las medias de los componentes podemos observar las diferencias entre especies. Autores como Sáenz (2006) reportan contenido de fibra soluble para cladodios secos de *Opuntia ficus-indica* de 14.5%. Observando la Tabla 17 se infiere que las especies en estudio representan un gran potencial para la extracción de mucílago ya que la mayoría tienen contenidos altos de fibra soluble, e incluso superiores al reportado excepto para las especies *O. joconostle* y *O. streptacantha*.

#### 7.4 EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO EN ESPECIES SILVESTRES DE *OPUNTIA* DE MICHOACÁN

Para la extracción de mucílago, se utilizó el método modificado por Rodríguez (2010) con base en los estudios realizados por Forni, *et al.* (1994), y Medina-Torres *et al.* (2000).

La materia prima fue colectada en el mes de mayo de 2011, en estación de primavera, en condiciones secas y muy soleadas. Los rendimientos de mucílago obtenidos para las cinco especies se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18. Rendimientos de mucílago de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa*.**

Especie	Gamos/300 g de cladodio fresco	Rendimiento %
<i>O. atropes</i>	2.40	<b>0.80</b>
<i>O. hyptiacantha</i>	2.11	<b>0.70</b>
<i>O. joconostle</i>	5.07	<b>1.69</b>
<i>O. streptacantha</i>	1.31	<b>0.44</b>
<i>O. tomentosa</i>	5.54	<b>1.85</b>

En la Tabla 18 podemos observar que se obtuvieron rendimientos superiores a los obtenidos por otros autores (Sáenz y Sepúlveda, 1993; Cárdenas *et al.*, 1997; Majdoub *et*

al., 2001; Sepúlveda y Sáenz, 2007; Abraján, 2008; Rodríguez, 2010), como fue el caso de la especie *Opuntia tomentosa* con un rendimiento de 1.84 %.

Los principales problemas detectados durante la extracción de mucílago, para todas las especies, fueron la proporción nopal:agua (1:2, w:V). Esta cantidad de agua resultó insuficiente para tener una adecuada molienda y extracción. El reducido volumen de agua, aunado a la alta temperatura de extracción (80 °C ± 2 °C/h) redujo la recuperación de mucílago y dificultó su posterior separación. Por todo ello, se corrobora la necesidad de optimizar el proceso de extracción de mucílago de *Opuntia* silvestres, que de acuerdo a los resultados de composición química poseen características distintas a la especie comercial *Opuntia ficus-indica*.

## 7.5 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

### 7.5.1 OPTIMIZACIÓN INICIAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

En la Tabla 19 se muestran los tres niveles de las cuatro variables que fueron incluidas en el diseño Box Behnken, utilizando la especie de nopal *O. tomentosa*, que fue la que presentó el mejor rendimiento de mucílago obtenido.

**Tabla 19. Niveles codificados y reales de las variables que afectan el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización inicial.**

Niveles codificados	N:A (w/v)	Temperatura de extracción(°C)	Tiempo de extracción (h)	Tiempo de centrifugación (min)
-1	1:3	65	1	10
0	1:5	74	2	20
1	1:7	83	3	30

N:A: Relación nopal:agua.

Los niveles codificados de los factores del diseño factorial  $2^k$  se obtuvieron aplicando la ecuación 1 y 2. A continuación se ejemplifica la codificación del nivel inferior de la temperatura de extracción:

$$D = (83 - 65) / 2 = 9$$

$$x_i = \frac{(65 - 74)}{9} = -1$$

Dónde:

$A_i$  es el  $i$ -ésimo nivel del factor  $A$ .

$\bar{A}$  es el nivel promedio del factor  $A$ .

El diseño experimental resultó en una matriz de 27 corridas experimentales y 3 repeticiones en el centro del diseño (Tabla 20). Los rendimientos para cada corrida experimental de acuerdo a los niveles de cada variable se registran en la Tabla 20.

**Tabla 20. Diseño Box Behnken para la optimización inicial del proceso de extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán.**

Corrida	N:A (w/V)	T.E. (°C)	t.E. (h)	t. C. (min)	N:A (w/V)	T.E. (°C)	t.E. (h)	t. C. (min)	% Rend.
1	0	-1	0	-1	1:5	65±2	2	-1	1.068
2	0	-1	0	1	1:5	65±2	2	1	1.730
3	-1	0	0	-1	1:3	74±2	2	-1	1.924
4	0	0	1	-1	1:5	74±2	3	-1	1.984
5	-1	1	0	0	1:3	83±2	2	0	1.419
6	-1	0	1	0	1:3	74±2	3	0	1.326
7	0	0	0	0	1:5	74±2	2	0	1.630
8	0	-1	-1	0	1:5	65±2	1	0	1.595
9	1	0	1	0	1:7	74±2	3	0	2.217
10	0	1	1	0	1:5	83±2	3	0	0.650
11	1	1	0	0	1:7	83±2	2	0	1.298
12	0	1	0	-1	1:5	83±2	2	-1	1.087
13	0	-1	1	0	1:5	65±2	3	0	0.838
14	0	0	1	1	1:5	74±2	3	1	1.011
15	-1	-1	0	0	1:3	65±2	2	0	0.868
16	0	0	0	0	1:5	74±2	2	0	1.642
17	0	1	-1	0	1:5	83±2	1	0	1.720
18	1	-1	0	0	1:7	65±2	2	0	0.999
19	0	0	-1	-1	1:5	74±2	1	-1	2.135
20	-1	0	0	1	1:3	74±2	2	1	1.249
21	0	0	0	0	1:5	74±2	2	0	1.961
22	1	0	0	-1	1:7	74±2	2	-1	1.216
23	-1	0	-1	0	1:3	74±2	1	0	2.026
24	0	1	0	1	1:5	83±2	2	1	0.436
25	1	0	-1	0	1:7	74±2	1	0	0.623
26	1	0	0	1	1:7	74±2	2	1	0.963
27	0	0	-1	1	1:5	74±2	1	1	0.816

(N:A (w/V)=Relación nopal: agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)= Tiempo de extracción, t. C. (min)= Tiempo de centrifugación y % Rend.=Rendimiento de mucílago en 100g de materia prima.

Con los resultados se ajustó un modelo de regresión lineal de segundo orden para cuatro variables.

Utilizando la tabla de análisis de varianza para el rendimiento de mucílago (Tabla 21) se pueden probar las siguientes hipótesis:

*Ho: El modelo no es adecuado*

*H1: El modelo es adecuado*

**Tabla 21. Análisis de la varianza para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización inicial.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Modelo	14	4.2255852	0.301828	1.4995	0.2439
Error	12	2.4153644	0.20128		
C. Total	26	6.6409496			

La probabilidad obtenida para el modelo es de 0.2439 (no es significativo, nivel de significancia de 0.05), lo que implica no rechazar la hipótesis nula, con lo que concluimos que el modelo no es adecuado.

Ahora, el coeficiente de determinación es calculado:

$$R^2 = \frac{4.2255852}{6.6409496}$$

$$R^2=0.63629232$$

Este coeficiente indica que el modelo explica el 63.63% de la variabilidad en la respuesta, por lo que concluimos que el modelo no explica de forma adecuada esta variabilidad.

Ahora bien, al observar la falta de ajuste en la Tabla (22) podemos evaluar las siguientes hipótesis:

*Ho: No hay falta de ajuste*

*H1: Hay falta de ajuste*

**Tabla 22. Análisis de la falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización inicial.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Falta de ajuste	10	2.3448757	0.234488	6.6532	0.1376
Error puro	2	0.0704887	0.035244		
Error total	12	2.4153644			

Concluimos entonces que no hay falta de ajuste en el modelo, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula.

La estimación de los parámetros para el rendimiento de mucílago de nopal, se presentan en la Tabla 23. En esta misma Tabla, se puede apreciar que el rendimiento de mucílago de nopal fue influenciado significativamente por la temperatura de extracción en su término cuadrático, y por la interacción entre la relación nopal: agua y el tiempo de extracción.

**Tabla 23. Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, optimización inicial.**

Parámetro	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob> t
Intersección	1.7443333	0.259024	6.73	<.0001*
N:A (w/V)	-0.124667	0.129512	-0.96	0.3548
T. E. (°C)	-0.040667	0.129512	-0.31	0.7589
t. E. (h)	-0.074083	0.129512	-0.57	0.5779
t. C. (min)	-0.267417	0.129512	-2.06	0.0612
N:A (w/V)*N:A (w/V)	-0.156083	0.194268	-0.8	0.4373
N:A (w/V)*T. E.(°C)	-0.063	0.224321	-0.28	0.7836
T. E. (°C)*T. E.(°C)	-0.458583	0.194268	-2.36	0.036*
N:A (w/V)*t. E. (h)	0.5735	0.224321	2.56	0.0252*
T. E. (°C)*t. E.(h)	-0.07825	0.224321	-0.35	0.7333
t. E. (h)*t. E.(h)	-0.054458	0.194268	-0.28	0.784
N:A (w/V)*t. C. (min)	0.1055	0.224321	0.47	0.6466
T. E. (°C)*t. C. (min)	-0.32825	0.224321	-1.46	0.1691
t. E. (h)*t. C. (min)	0.0865	0.224321	0.39	0.7065
t. C. (min)*t. C. (min)	-0.219708	0.194268	-1.13	0.2802

Donde: N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)= Tiempo de extracción, t. C. (min)= Tiempo de centrifugación y % Rend.=Rendimiento de mucílago en 100 g de materia prima. \* Significativo para  $\alpha = 0.05$ .

Los parámetros determinados como significativos fueron incluidos en la ecuación del modelo para el rendimiento de mucílago de nopal, resultando la siguiente ecuación:

$$Y = 1.7443 - 0.4586X_2^2 + 0.5735X_1X_3$$

Donde  $X_1$  =Relación nopal:agua (N:A (w/V)),  $X_2$ = Temperatura de extracción (T.E. (°C)) y  $X_3$ = Tiempo de extracción (t. E. (h))

La solución estimada por mínimos cuadrados, obtenida en JMP IN es:

Variable	Valor crítico
N:A (w/V)	0.3045602
T. E. (°C)	0.0701075
t. E. (h)	0.4815541
t. C. (min)	-0.493026

El valor previsto del rendimiento de mucílago de nopal en la solución para el modelo es 1.77 %. Ahora los valores codificados de la solución son transformados usando la ecuación (1), obteniendo los valores reales registrados en Tabla 24.

**Tabla 24. Valores reales de las variables codificadas de la optimización inicial para el modelo de rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán.**

Variable	Valor real
N:A (w/V)	1:5.85
T. E. (°C)	74.63
t. E. (hr)	2.48
t. C. (min)	15.06

N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)= Tiempo de extracción, t. C. (min)= Tiempo de centrifugación.

En la primera optimización el modelo ajustado no fue el más adecuado, debido a que se trabajó con materia prima obtenida a finales de primavera y durante el verano, con lo cual se pudo observar que la estación es otro factor que afecta el rendimiento, como se muestra en la Tabla 20. Sin embargo la primera optimización ayudó a establecer la dirección en la cual la respuesta se aproxima más rápidamente a la condición óptima.

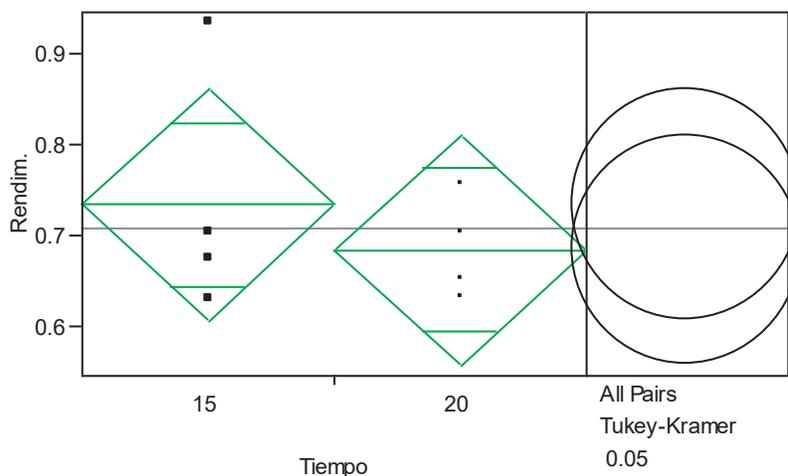
Además, mediante esta primera optimización se pudo realizar un cribado de factores; es decir de las cinco variables a saber: Relación nopal:agua (N:A (w/V), Temperatura de extracción( T.E. (°C)), Tiempo de extracción (t.E. (h)) y Tiempo de centrifugación (t. C. (min)), se puso en consideración el Tiempo de centrifugado, como variable que no ejerce influencia significativa sobre el rendimiento de mucílago, es decir el tiempo de 15 y 20 min. utilizado en la etapa de centrifugación ejerce el mismo efecto en la recuperación de mucílago. Para comprobar esta hipótesis se realizó un análisis estadístico ANOVA.

Para el diseño experimental se establecieron 4 corridas, se realizó la experimentación por duplicado obteniendo una matriz de 8 corridas. Se realizó la colecta de *Opuntia tomentosa* el 4 de septiembre de 2011 (estación, de verano, lluvias en exceso), y se realizó la extracción de mucílago de 100 g de materia prima, de acuerdo a las variables optimizadas en la fase inicial: Relación nopal agua 1:6 (w/V), Temperatura de extracción 75 °C y Tiempo de extracción 2.5 h, evaluando los dos niveles (15 y 20 min) del Tiempo de centrifugado, obteniendo los resultados registrado en la Tabla 20.

**Tabla 25. Diseño experimental y rendimiento de mucílago seco (%) en función del tiempo de centrifugado en el proceso de extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán.**

Tiempo de centrifugado (min)	Rendimiento de mucílago seco (%)
15	0.9341
15	0.6289
15	0.6741
15	0.7013
20	0.7548
20	0.6301
20	0.7021
20	0.6514

Con los datos presentados en la Tabla 25 se estableció el análisis estadístico ANOVA usando el software SAS JMP Statistical Discovery, con el objetivo de ver si había diferencia significativa entre los tiempos: 15 y 20 min usados en la etapa de centrifugación en el proceso de extracción de mucílago. Para ello primeramente se comprobó mediante la prueba de Shapiro-Wilk que los datos para cada uno de los tiempos se ajustaran a una distribución normal. Una vez comprobando esto, resulta que en los dos casos nos encontramos alejados del valor permitido de 5 % (Prob.: 0.152 para 15 min y 0.729 para 20 min). Posteriormente, se realizó un análisis de la varianza para comprobar la hipótesis experimental que señala: no existe diferencia entre los tiempos de 15 y 20 min que afecte el rendimiento de mucílago. Al realizar el análisis de varianza se obtuvo una probabilidad de 0.5224 (valor mayor al nivel de significancia 0.05), por lo que no se rechaza la hipótesis nula, no hay diferencia entre los tiempos.



**Figura 9. Análisis de varianza de la variable tiempo de centrifugado en dos niveles (ANOVA,  $\alpha=0.05$ ).**

Se estableció por tanto un tiempo de 15 min en la etapa de centrifugación en el proceso de extracción de mucílago, con ello esta variable queda fija y tenemos 3 variables para generar un nuevo diseño, a saber: Relación nopal: agua (N:A (w/V)), Temperatura de extracción (T.E. (°C)), Tiempo de extracción (t.E. (h)).

## 7.5.2 SEGUNDA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Para la segunda optimización se seleccionó un diseño Box Behnken, los niveles para el diseño experimental se escogieron tomando en cuenta dos factores: la primera optimización y la estacionalidad. En la tabla 26 se muestran los valores originales:

**Tabla 26. Niveles codificados y reales de las variables que afectan el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Niveles codificados	Relación nopal:agua N:A (w/v)	Temperatura de Extracción(°C)	Tiempo de Extracción (h)
-1	1:3	69	1
0	1:45	76	2
1	1:6	83	3

**Tabla 27. Resultados del diseño Box Behnken para la segunda optimización del proceso de extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Corrida	N:A (w/V)	T. E.(°C)	t. E. (h)	N:A (w/V)	T.E. (°C)	t.E. (h)	Rend. %
1	-1	-1	0	1:3	69±2	2	1.037
2	1	1	0	1:6	83±2	2	1.6306
3	0	0	0	1:45	76±2	2	1.2841
4	-1	0	1	1:3	76±2	3	0.8918
5	0	0	0	1:45	76±2	2	1.2923
6	-1	0	-1	1:3	76±2	1	1.1443
7	-1	1	0	1:3	83±2	2	0.9186
8	0	-1	1	1:45	69±2	3	1.313
9	1	0	-1	1:6	76±2	1	1.3458
10	1	-1	0	1:6	69±2	2	1.244
11	1	0	1	1:6	76±2	3	1.4083
12	0	0	0	1:45	76±2	2	1.2689
13	0	1	1	1:45	83±2	3	0.9961
14	0	-1	-1	1:45	69±2	1	1.2639
15	0	1	-1	1:45	83±2	1	1.178

N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)= Tiempo de extracción, y % Rend.=Rendimiento de mucílago en 100 g de materia prima.

En la Tabla 27 observamos el diseño experimental resultante, con 15 corridas experimentales y 3 repeticiones en el centro del diseño. La extracción de mucílago se llevó acabo de acuerdo a las operaciones de la Figura 5. Los rendimientos para cada corrida experimental de acuerdo a los niveles de cada variable se registran en la Tabla 27.

Utilizando la Tabla 28, se pueden probar las siguientes hipótesis:

*Ho: El modelo no es adecuado*

*H1: El modelo es adecuado*

**Tabla 28. Análisis de la varianza para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Modelo	9	0.46994254	0.052216	4.2095	0.0640
Error	5	0.06202118	0.012383		
C. Total	14	0.53196372			

La probabilidad obtenida para el modelo es de 0.0640; cercana al nivel de significancia (el 0.05), lo que implica el no rechazar la hipótesis nula, sin embargo es un modelo muy cercano al adecuado, por lo que lo tomaremos como tal; es decir las variables tienen influencia sobre el rendimiento de mucílago.

Ahora bien, el coeficiente de determinación se calculó como sigue:

$$R^2 = \frac{0.46994254}{0.53196372}$$

$$R^2=0.88341088$$

Este coeficiente indica que el modelo explica el 88.34% de la variabilidad en la respuesta, por lo que concluimos que el modelo explica de forma adecuada esta variabilidad.

Para comprobar si el modelo es adecuado se efectuó una prueba de hipótesis o *prueba de falta de ajuste*.

Ahora bien al observar la falta de ajuste en la Tabla 29, se evaluó las siguientes hipótesis:

*Ho: Hay falta de ajuste en el modelo*

*H1: No hay falta de ajuste en el modelo*

**Tabla 29. Falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Falta de ajuste	3	0.06173923	0.020580	145.9832	0.0068
Error puro	2	0.00028195	0.000141		
Error total	5	0.06202118			

Se observa en la Tabla 29 que el valor de Prob > F es 0.0068, lo cual significó el rechazo de la hipótesis nula (Ho), es decir, no hay falta de ajuste en el modelo.

La estimación de los parámetros para el rendimiento de mucílago de nopal, se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 30. Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Parámetro	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob> t
Intercepto	1.2817667	0.064302	19.93	<.0001*
N:A (w/V)	0.204625	0.039377	5.20	0.0035*
T.E. (°C)	-0.016825	0.039377	-0.43	0.6869
t.E. (h)	-0.04035	0.039377	-1.02	0.3525
N:A (w/V)*T.E. (°C)	0.12625	0.055687	2.27	0.0727
N:A (w/V)*t.E. (h)	0.07875	0.055687	1.41	0.2165
T.E. (°C)*t.E. (h)	-0.05775	0.055687	-1.04	0.3472
N:A (w/V)*N:A (w/V)	-0.032208	0.057961	-0.56	0.6024
T.E. (°C)*T.E. (°C)	-0.042008	0.057961	-0.72	0.5011
t.E. (h)*t.E. (h)	-0.052008	0.057961	-0.90	0.4107

(N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)=Tiempo de extracción,

\* Significativo para  $\alpha = 0.05$ .

En la Tabla 30 se muestra que el rendimiento de mucílago de nopal depende significativamente de la relación nopal:agua.

A continuación se presenta la ecuación del modelo para el rendimiento de mucílago de nopal:

$$Y = 1.2818 + 0.2046X_1 - 0.0168X_2 - 0.0404X_3 + 0.1263X_1X_2 + 0.0788X_1X_3 - 0.0578X_2X_3 - 0.0322X_1^2 - 0.0420X_2^2 - 0.0520X_3^2$$

Donde  $X_1$  = Relación nopal: agua (N:A (w/V)),  $X_2$  = Temperatura de Extracción (T.E. (°C)) y  $X_3$  = Tiempo de Extracción (t. E. (h)).

La solución estimada por mínimos cuadrados y obtenida en JMP IN es:

Variable	Valor crítico
N:A (w/V)	-1.448437
T. E. (°C)	-2.193471
t. E. (hr)	-0.266702

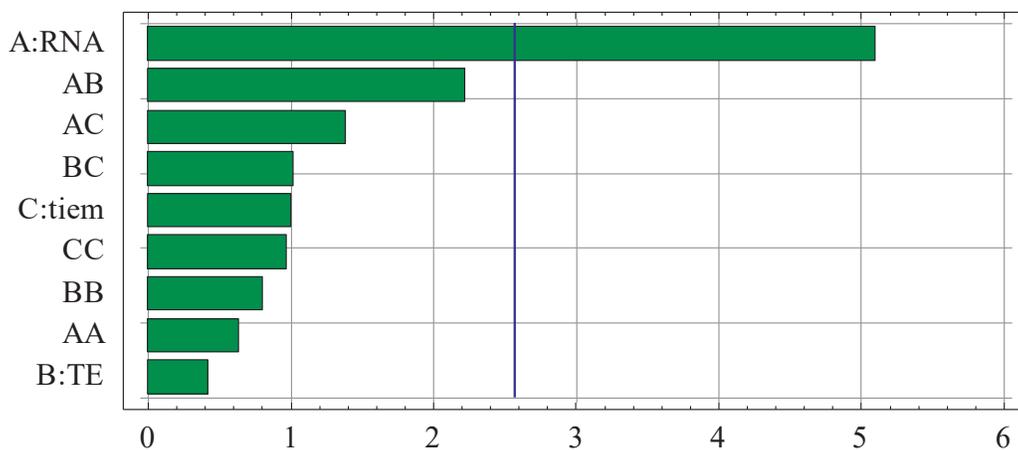
El valor previsto del rendimiento de mucílago de nopal en la solución para el modelo es 1.1574%. Ahora, transformando los valores codificados de la solución usando la ecuación (1), tenemos:

**Tabla 31. Valores reales de las variables codificadas para el modelo de rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**

Variable	Valor real
N:A (w/V)	1:2
T. E. (°C)	60.65
t. E. (hr)	1.7

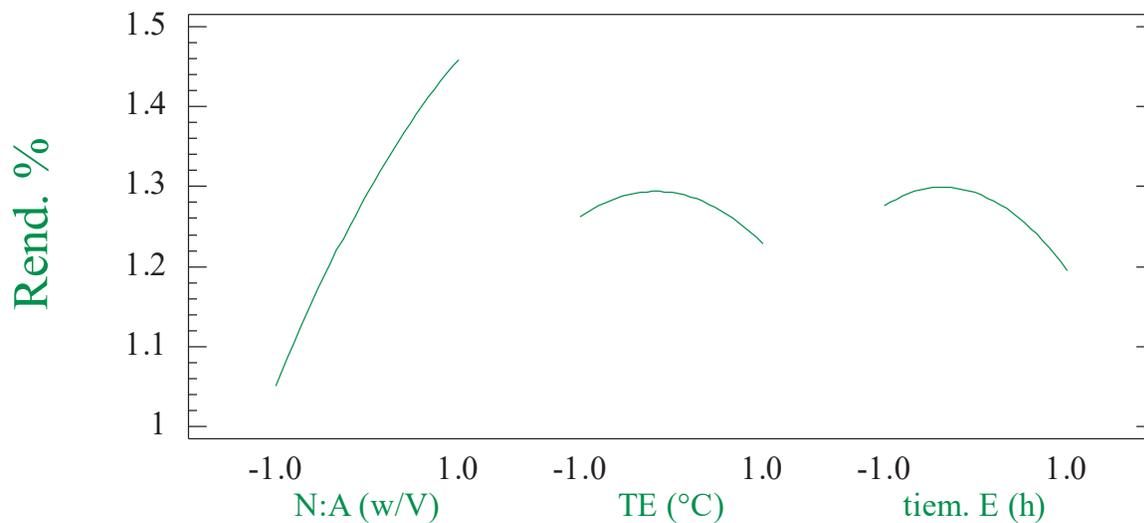
N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción, t.E. (h)= Tiempo de extracción.

En el diagrama de Pareto (Figura 10) podemos observar los efectos de las variables individuales y las interacciones entre variables, para así visualizar las variables que tienen mayor impacto sobre el rendimiento de mucílago, en este caso la variable relación nopal-agua (N:A(w/V)) es la que ejerce mayor influencia sobre el rendimiento de mucílago en el proceso de extracción.



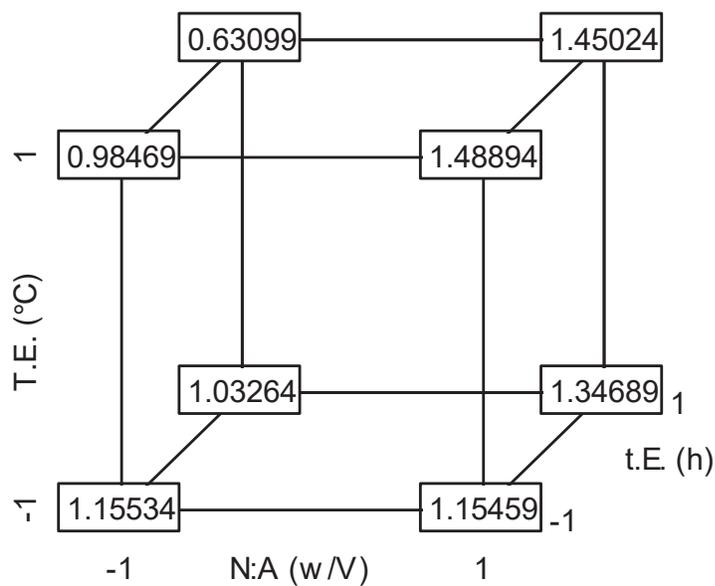
A (RNA): N:A (w/V)=Relación nopal: agua, B(TE): T.E. (°C)= Temperatura de extracción, C (tiem): t.E. (h)= Tiempo de extracción.

**Figura 10. Diagrama de Pareto de efectos estimados de las variables sobre el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la segunda optimización.**



**Figura 11. Rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán en función de las variables de extracción (N:A = Proporción nopal agua; TE (°C) = Temperatura y tiem. E (h) = Tiempo de extracción), segunda optimización.**

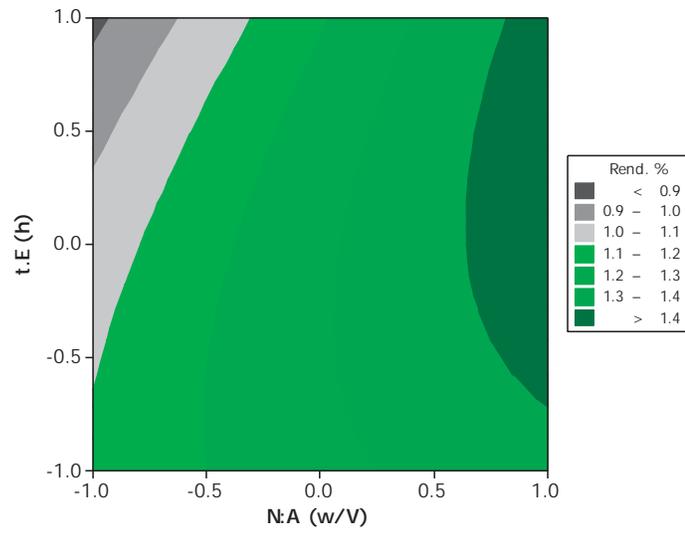
En la Figura 11 podemos observar que la variable con mayor efecto es la relación nopal:agua, donde a mayor relación tenemos mayores rendimientos, mientras que el efecto mayor de las otras dos variables se centra en el punto medio del valor codificado.



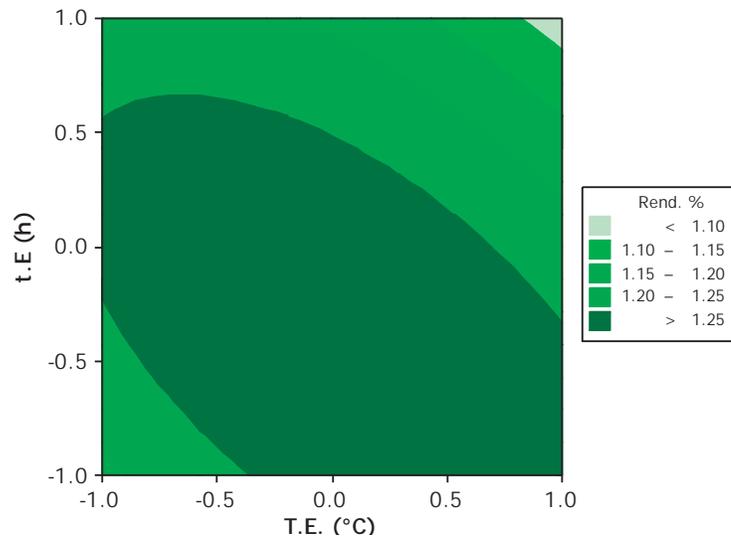
**Figura 12. Gráfico de cubo y respuesta predicha para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, segunda optimización.**

En el gráfico de cubo podemos apreciar la respuesta predicha en cada punto del diseño, se observa que a mayores relaciones de nopal: agua y temperaturas elevadas la predicción de rendimientos es mayor.

A)



B)



C)

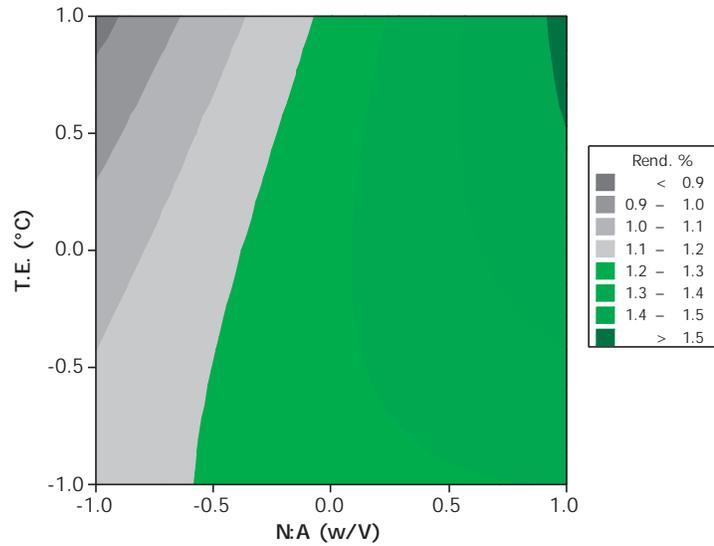
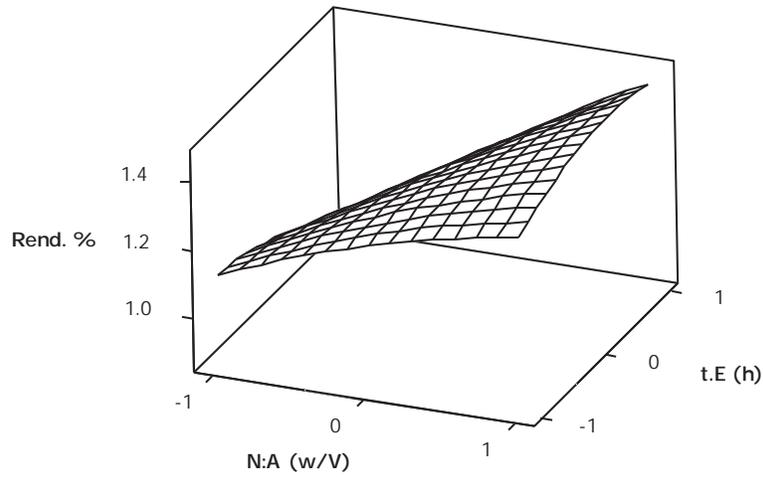
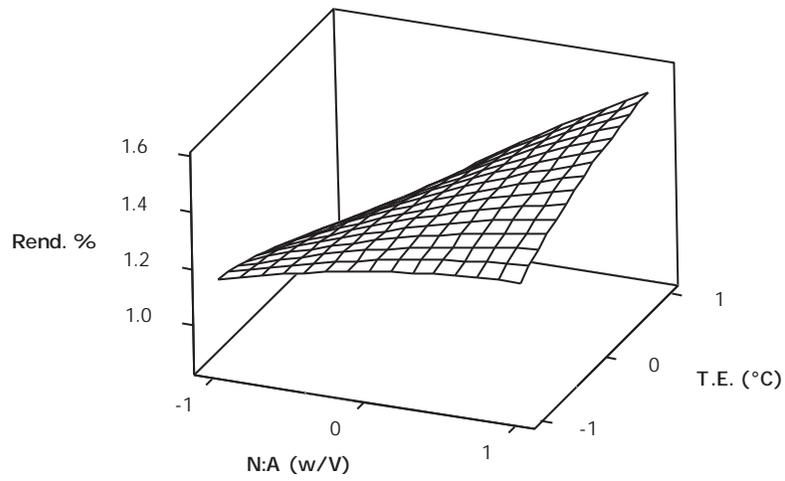


Figura 13. Gráficos de contornos para la extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, segunda optimización.

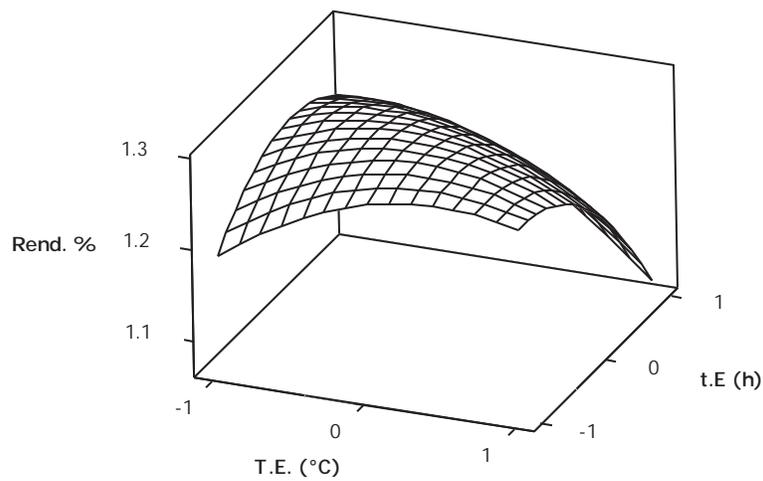
A)



B)



C)



**Figura 14. Gráficos de superficie de respuesta del modelo ajustado para la extracción de mucílago de *O. tomentosa* en la estación de verano.**

En el gráfico de contornos (Figura 13) podemos observar con bastante exactitud las coordenadas codificadas de la región óptima, con la combinación de cada par de variables. En la Figura 13 A), se observa que las coordenadas de la región óptima están arriba de 1 para la relación nopal:agua y para el tiempo de extracción entre 0 y 0.5. Mientras que en la Figura 13 C), se observa que la región óptima se localiza en coordenadas con valores superiores a 1, tanto para la variable temperatura de extracción, como para la relación nopal:agua. Con estos resultados podemos avanzar hacia la región óptima generando un nuevo diseño, así mismo tanto en el Figura 13 como 14, se establece que el tiempo de extracción (h) puede mantenerse como una variable fija, el valor codificado óptimo seleccionado es 0 y su correspondiente valor real es un tiempo de 2 h.

En la Figura 14, se muestran los gráficos de superficie de respuesta del modelo ajustado, y podemos observar que para las tres superficies de respuesta, se graficaron dos factores en cada una de ellas y que el tercer factor es constante para cada caso. En la figura 14 B) vemos que los rendimientos predichos son superiores a 1.5 % y que se presentan en valores por encima de las coordenadas codificadas (1,1).

### 7.5.3 OPTIMIZACIÓN FINAL DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL

Se comprobó estadísticamente que en el tiempo de centrifugado entre 15 y 20 min, no hay diferencia significativa en el rendimiento obtenido a dichos tiempos, por lo que se estableció un tiempo fijo de 15 min de centrifugación, durante el proceso de extracción de mucílago de nopal.

De acuerdo a la segunda optimización la variable tiempo de extracción (t.E. (h)), se estableció de manera fija en un tiempo de 2 h.

Con todo lo anterior tenemos que las principales variables que ejercen influencia sobre el rendimiento de mucílago en el proceso de extracción son la relación nopal:agua (N:A (w/V)) y la temperatura de extracción (T.E. (°C)). Cada uno de estos factores, fueron

evaluados con dos niveles de variación, que se establecieron de la siguiente manera: para la Relación nopal-agua: 1:6 y 1:8 (w/V) y para la Temperatura de extracción: 75 y 83°C.

Por tanto se uso un diseño experimental factorial  $2^2$  dando como origen una matriz de cuatro corridas experimentales, que se realizó por triplicado con tres puntos centrales, lo cual nos permitió una exploración más completa de la superficie de análisis.

**Tabla 32. Diseño factorial  $2^2$  para la optimización final del proceso de extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán.**

Corrida	N:A (w/V)	T. E.(°C)	N:A (w/V)	T.E. (°C)	Rend. %
1	1	-1	1:8	75±2	1.1651
2	1	1	1:8	83±2	1.5514
3	0	0	1:7	79±2	1.0921
4	-1	1	1:6	83±2	1.2024
5	-1	-1	1:6	75±2	1.0671
6	1	-1	1:8	75±2	1.177
7	-1	-1	1:6	75±2	1.0666
8	-1	1	1:6	83±2	1.1995
9	1	-1	1:8	75±2	1.1531
10	-1	-1	1:6	75±2	1.0059
11	0	0	1:7	79±2	1.0117
12	1	1	1:8	83±2	1.3514
13	0	0	1:7	79±2	1.0869
14	1	1	1:8	83±2	1.4814
15	-1	1	1:6	83±2	1.2526

N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción y % Rend.=Rendimiento de mucílago en 100g de materia prima.

En la Tabla 32 observamos el diseño experimental resultante, con 15 corridas experimentales y 3 repeticiones en el centro del diseño. Los rendimientos para cada corrida experimental de acuerdo a los niveles de cada variable se registran en la Tabla 32.

Con los resultados se ajustó un modelo de regresión lineal de primer orden, con dos variables. La Tabla 33 muestra los resultados del análisis de varianza para el rendimiento de mucílago. A continuación, se pusieron a prueba las siguientes hipótesis:

*Ho: El modelo no es adecuado*

*H1: El modelo es adecuado*

**Tabla 33. Análisis de la varianza del factorial 2<sup>2</sup> para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización final.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Modelo	3	0.27406351	0.091355	11.1606	0.0012
Error	11	0.09004001	0.008185		
C. Total	14	0.36410352			

La probabilidad obtenida para el modelo fue de 0.0012 para un nivel de significancia de 0.05, lo que implica el rechazo de la hipótesis nula y por lo tanto, el modelo es el adecuado; es decir las variables tienen influencia sobre el rendimiento de mucílago.

Ahora bien, el coeficiente de determinación resulta:

$$R^2 = \frac{0.27406351}{0.36410352}$$

$$R^2=0.75270766$$

Este coeficiente indica que el modelo explica el 75.27% de la variabilidad en la respuesta. Para comprobar si el modelo es adecuado se efectuó una prueba de hipótesis conocida como *prueba de falta de ajuste*.

Como se determinó que existe una falta de ajuste en el modelo, en la Tabla 34 podemos evaluar las siguientes hipótesis:

*Ho: Hay falta de ajuste en el modelo*

*H1: No hay falta de ajuste en el modelo*

**Tabla 34. Análisis de la falta de ajuste del modelo para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización final.**

Fuente de Variación	Gados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón F	Prob > F
Falta de ajuste	1	0.06084624	0.060846	20.8422	0.0010
Error puro	10	0.02919377	0.002919		
Error total	11	0.09004001			

Se observa en la Tabla 34 que el valor de Prob > F es 0.0010, lo cual significa que rechazamos la Ho (hipótesis nula), lo cual indica que no hay falta de ajuste, el modelo es el adecuado.

La estimación de los parámetros para el rendimiento de mucílago de nopal, se presentan en la Tabla 35.

**Tabla 35. Estimación de parámetros estadísticos para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, en la optimización final.**

Parámetro	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob> t
Intercepto	1.1909467	0.02336	50.98	<.0001*
N:A (w/V)	0.0904417	0.026117	3.46	0.0053*
T.E. (°C)	0.1169917	0.026117	4.48	0.0009*
N:A (w/V)*T.E. (°C)	0.031175	0.026117	1.19	0.2577

(N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción,

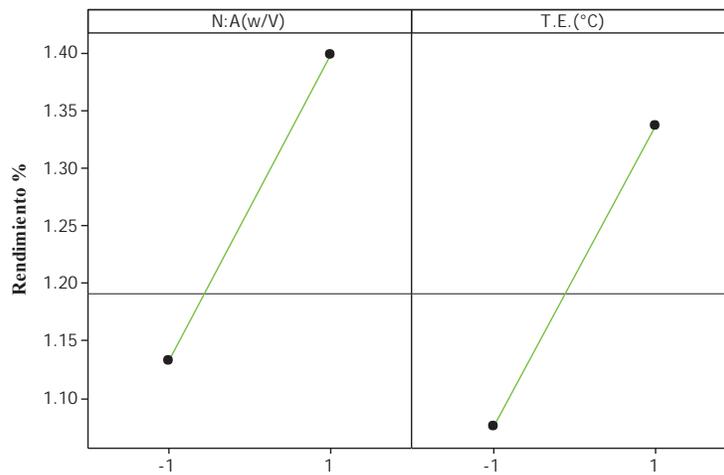
\* Significativo para  $\alpha = 0.05$

En la Tabla 35 se puede apreciar que el rendimiento de mucílago de nopal fue influenciado significativamente por la Relación nopal: agua y la Temperatura de Extracción, mientras que la interacción de estas dos variables no causan efecto significativo sobre el rendimiento del mucílago.

A continuación se presenta la ecuación del modelo para el rendimiento de mucílago de nopal:

$$Y = 1.1909 + 0.0904X_1 + 0.1170X_2 - 0.0312.X_1X_2$$

Donde  $X_1$  = Relación nopal: agua (N:A (w/V)),  $X_2$  = Temperatura de extracción (T.E. (°C)).

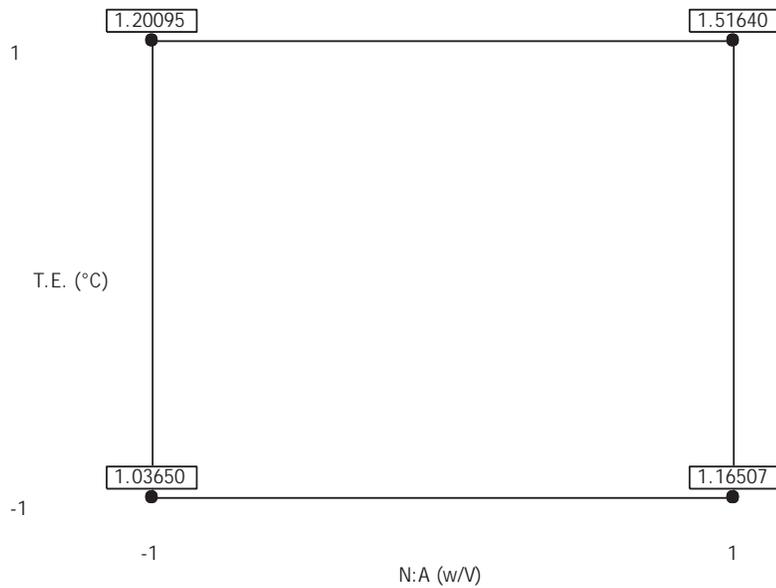


(N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de Extracción.

**Figura 15. Representación de los efectos principales de las variables del proceso de extracción de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, sobre el rendimiento en la optimización final.**

En la Figura 15 podemos observar el efecto de cada variable sobre el rendimiento de mucílago, el cual fue mayor en los valores codificados (1,1) de las variables en estudio, también detectamos que la variable que ejerce mayor efecto sobre el rendimiento es la relación nopal:agua.

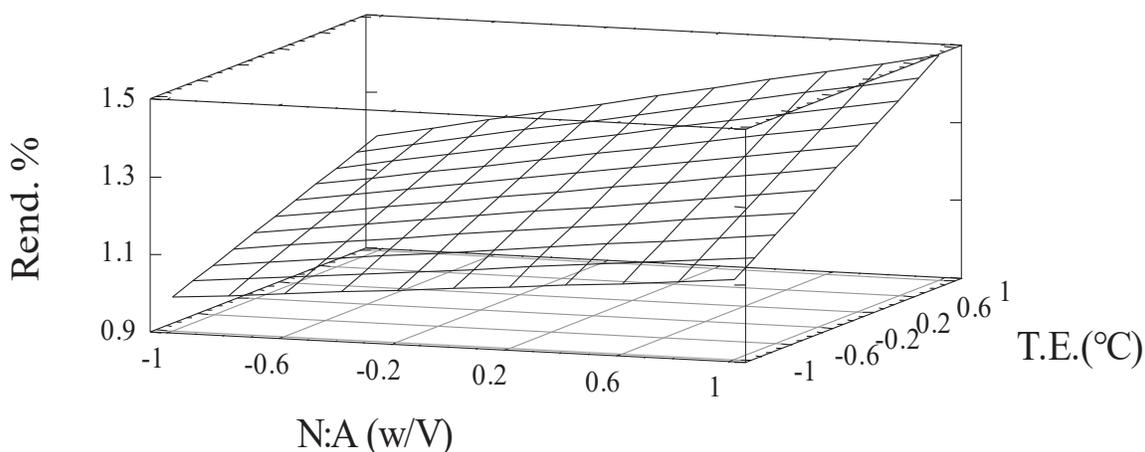
La solución estimada, es decir el mejor tratamiento en el análisis estadístico se muestra en la Figura 16.



(N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción.

**Figura 16. Gráfico de cubo y respuesta predicha para el rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán, optimización final.**

En el gráfico de cubo (Figura 16) se aprecia la respuesta predicha en cada punto del diseño, observando que el mejor tratamiento es el de coordenadas codificadas (1,1), con valores originales de Relación nopal:agua: 1:8 (w/V) y Temperatura de extracción: 83 °C, teniendo una respuesta predicha de 1.52 % de rendimiento de mucílago deshidratado.



(N:A (w/V)=Relación nopal:agua, T.E. (°C)= Temperatura de extracción y Rend. %=Rendimiento.

**Figura 17. Gráfico de superficie de respuesta del modelo ajustado. Rendimiento de mucílago de *Opuntia tomentosa* de Michoacán en función de las variables de extracción, optimización final.**

Finalmente en la Figura 17 se muestra la superficie de respuesta, descrita por un modelo de primer orden, con forma de superficie máxima, detectando el mejor tratamiento con coordenadas (1,1) para las variables en estudio.

## **7.6 COMPARACIÓN MEDIDA EN PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE MUCÍLAGO ENTRE EL MÉTODO OPTIMIZADO Y EL INICIAL**

En la Tabla 36 se pueden observar los rendimientos obtenidos para el método optimizado de extracción de mucílago de nopal de las especies *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* de Michoacán y el método inicial (Forni *et al.*, 1994 modificado por Rodríguez, 2010), así mismo se observa el nivel de mejora (determinado con la ecuación 3) medido en porcentaje de rendimiento con respecto al método inicial.

**Tabla 36. Comparación de los rendimientos de extracción de mucílago de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* de Michoacán, comparando los métodos de extracción inicial y optimizado.**

<b>Especie</b>	<b>Método inicial % Rendimiento</b>	<b>Método Optimizado % Rendimiento</b>
<i>O. atropes</i>	2.1201 b	2.6216 b
<i>O. hyptiacantha</i>	1.5976 c	2.1103 c
<i>O. joconostle</i>	2.3705 a	3.2144 a
<i>O. streptacantha</i>	0.4225 e	0.6966 d
<i>O. tomentosa</i>	1.3703 d	1.8102 c

Letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencia estadística en las medias, Tukey-Kramer HSD.

En la Tabla 36 podemos corroborar que los rendimientos de mucílago son mayores en la metodología optimizada para todos los casos, presentando mayor rendimiento la especie *O. joconostle* con un 3.21 %, seguida por *O. atropes* y sin diferencia significativa en las medias, las especies *O. tomentosa* y *O. hyptiacantha*.

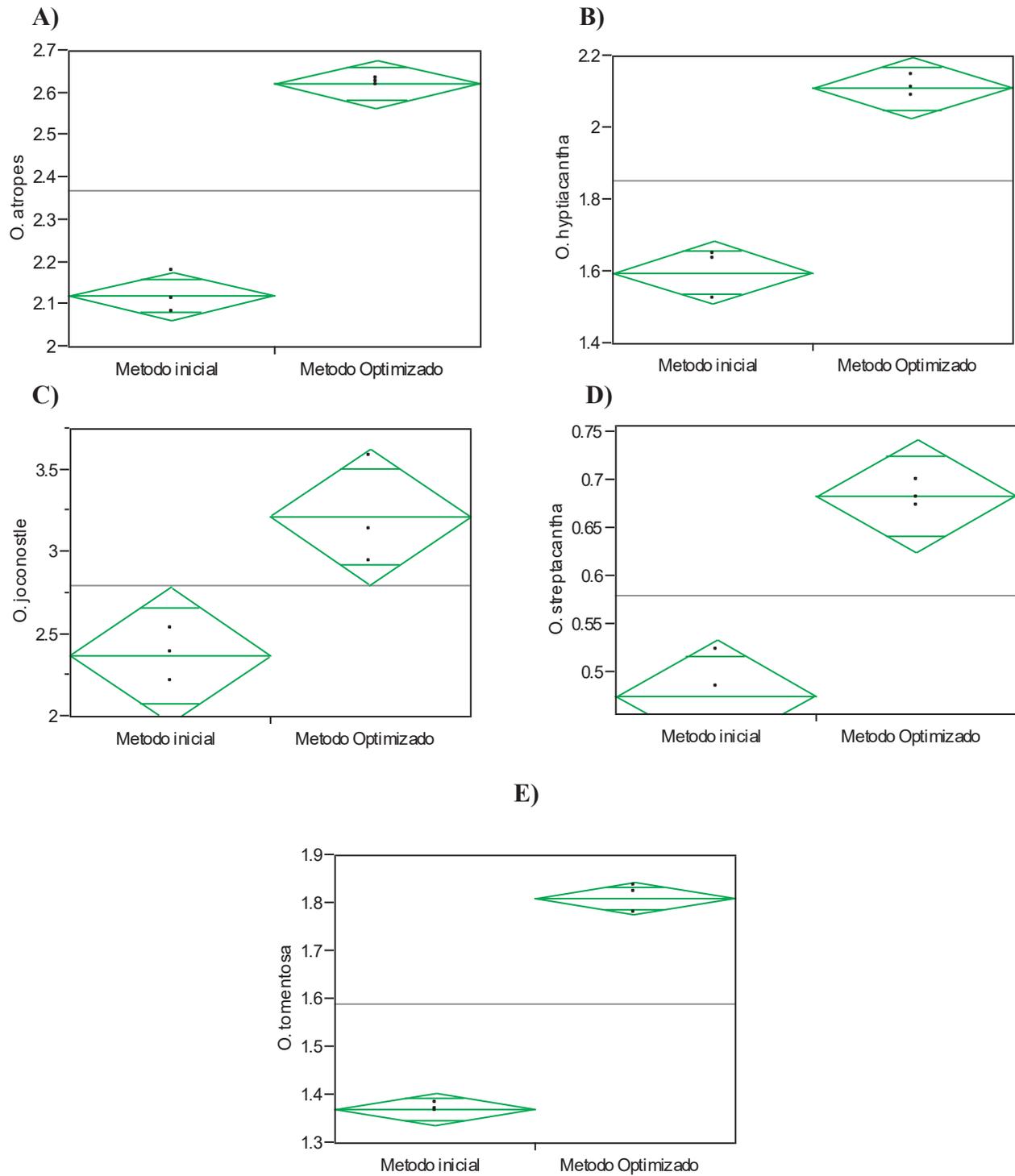
Ahora bien aplicando la Fórmula 3, se obtiene el nivel de mejora medido en % de rendimiento con respecto al rendimiento obtenido con el método inicial (Tabla 37).

**Tabla 37. Nivel de mejora del método optimizado con respecto al método inicial, medido en % de rendimiento de mucílago seco para las especies de *Opuntia* estudiadas.**

<b>Especie</b>	<b>Nivel de mejora % Rendimiento</b>
<i>O. atropes</i>	23.65
<i>O. hyptiacantha</i>	32.09
<i>O. joconostle</i>	35.60
<i>O. streptacantha</i>	43.67
<i>O. tomentosa</i>	32.10

En la Tabla 37 podemos observar que aplicando las condiciones establecidas mediante la optimización del proceso de extracción del mucílago de nopal, se obtuvo por ejemplo un 35.60 % más de mucílago seco con respecto al obtenido con el método inicial en el caso de la especie joconostle y para la especie con menor rendimiento, *O. streptacantha* un 43.67 % más de rendimiento. Promediando tenemos un nivel de mejora para el método optimizado del 33.42 % más de mucílago seco con respecto al método inicial.

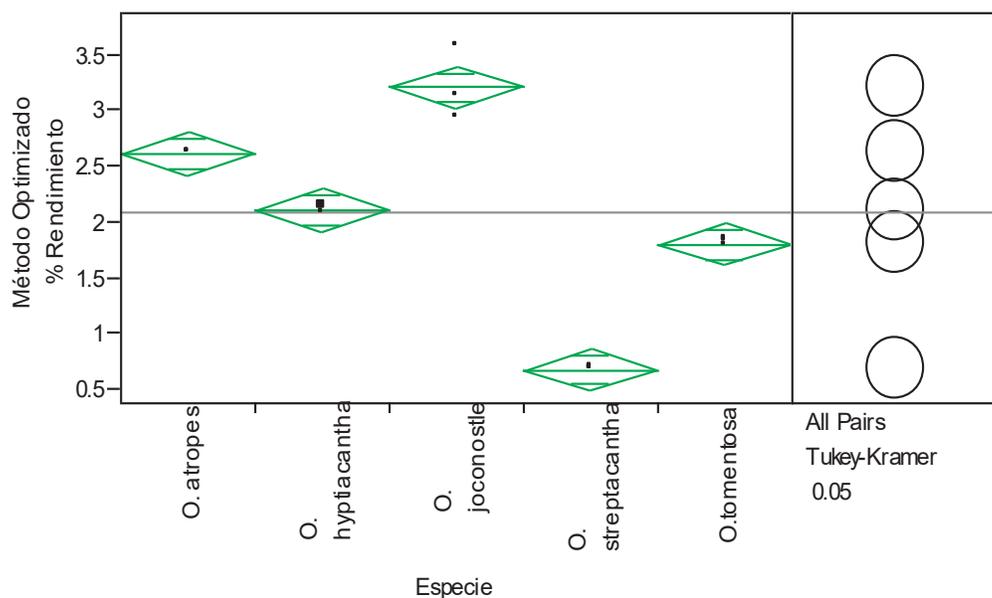
Ahora mediante la prueba de Shapiro-Wilk se confirmó que los datos obtenidos se ajustaron a una distribución normal. Mediante el análisis de la varianza (ANOVA) se observó que hay diferencia significativa (todas las  $\alpha < 0.05$ ) entre los rendimientos del método optimizado y el método inicial evaluado en cada especie.



**Figura 18. Análisis de varianza del porcentaje de rendimiento de mucílago de cinco especies de *Opuntia*, comparando dos métodos de extracción. A) *O. atropes* B) *O. hyptiacantha* C) *O. joconostle* D) *O. streptacantha* E) *O. tomentosa*. (ANOVA,  $\alpha=0.05$ ).**

Para todas las especies en estudio hubo diferencia estadística significativa entre los rendimientos obtenidos por el método inicial (método modificado por Rodríguez, 2010 en base a los estudios por Forni, *et al.*, 1994, y Medina-Torres *et al.*, 2000) y el método optimizado, mediante el cual se obtuvieron mayores rendimientos en todas las especies, superando así al método inicial de extracción de mucílago de nopal (Figura 18).

La Figura 19 y la Tabla 38 permitieron comparar estadísticamente los rendimientos de mucílago obtenidos de las cinco especies de *Opuntia* de Michoacán por el método optimizado de extracción, y establecer las especies que brinden el mayor rendimiento, y se proponga como la mejor especie para su explotación a gran escala.



**Figura 19. Análisis de varianza del porcentaje de rendimiento de mucílago de cinco especies de *Opuntia*. Método Optimizado (ANOVA,  $\alpha=0.05$ ).**

**Tabla 38. Comparación de medias del porcentaje de rendimiento de mucílago de *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* para el método optimizado (Prueba de Tukey-Kramer HSD).**

Especie	Diferencia			Media
<i>O. joconostle</i>	A			3.2144000
<i>O. atropes</i>		B		2.6215667
<i>O. hyptiacantha</i>			C	2.1103000
<i>O. tomentosa</i>			C	1.8101667
<i>O. streptacantha</i>			D	0.6832333

La Tabla 38 muestra los rendimientos obtenidos para las cinco especies de *Opuntia* donde *O. joconostle* tuvo el mejor rendimiento, seguida de *O. atropes* y en la tercera posición las especies *O. tomentosa* y *O. hyptiacantha* sin diferencia significativa entre sus medias.

## 8. CONCLUSIONES

La caracterización morfológica de cinco especies de *Opuntia* del Estado de Michoacán: *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. streptacantha*, y *O. tomentosa* permitió reconocer las especies *in situ* y garantizar su identidad taxonómica.

La caracterización química mostró varias diferencias entre las especies. *Opuntia tomentosa* presentó el mayor porcentaje de fibra soluble (17.61%), lo que sugiere que el contenido de mucílago es mayor en comparación con las otras especies y comparado con la especie comercial *O. ficus-indica* (14.5%), representando un gran potencial para la obtención de mucílago. Sin embargo podemos concluir que el mucílago precipitado en el proceso de extracción no depende del contenido fibra soluble en la materia prima inicial, si no de la interacción de iones en la disolución, lo cual se confirmó al obtener mayor rendimiento de mucílago en la especie joconostle que contenía la menor cantidad de fibra soluble.

La optimización permitió realizar un cribado de variables que producen efecto sobre el rendimiento de mucílago, finalmente se obtuvo un modelo lineal apropiado, obteniendo las condiciones óptimas para cada una de las variables que intervienen en el proceso de extracción de mucílago de nopal. Teniendo los valores de las variables son Relación nopal:agua 1:8 (w/V), Temperatura de extracción 83°C, Tiempo de extracción 2 h y Tiempo de centrifugado de 15min; se puede predecir un rendimiento superior al 1.51%.

Durante la optimización se observó que la estación climática y el tipo de suelo afectan la producción de mucílago de nopal, lo que sugiere que las condiciones optimizadas establecidas pueden predecir un rendimiento mayor en otra estación del año, sobre todo en condiciones climáticas con poca lluvia y muy soleadas.

El rendimiento de mucílago en cuatro de las cinco especies, *O. atropes*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle* y *O. tomentosa* en el presente estudio fue superior a 1.8 %, comparado a los valores reportados por diferentes autores en el mundo es superior. Esto confirma la importancia del aprovechamiento integral y la industrialización de estas especies.

## **9. RECOMENDACIONES**

Se sugiere que en estudios posteriores debería incluirse la optimización del proceso de extracción del mucílago de nopal considerando los factores de estación climatológica y ubicación geográfica de los recursos naturales en estudio.

Evaluar el efecto de iones en la solución de mucílago en la cinética de precipitación de estas moléculas.

Realizar la caracterización fisicoquímica y analizar las propiedades biofísicas de los mucílagos obtenidos de las cinco especies de *Opuntia* estudiadas en la presente investigación.

## **10. PERSPECTIVAS**

La investigación plasmada en esta tesis abre las puertas a futuras investigaciones sobre el estudio de especies de *Opuntia* diferentes a la comercial *O. ficus-indica*, permitiendo la valoración de estas especies para su industrialización.

Realizar un estudio de mercado y un estudio técnico sobre la posible industrialización de alguna(s) especie(s) de *Opuntia* del Estado de Michoacán, generando un aprovechamiento integral del nopal, con la obtención de por lo menos dos productos de valor agregado tales como el mucílago en polvo y la fibra insoluble de nopal, y su aplicación en las áreas farmacéutica y alimentaria.

## 11. REFERENCIAS

AACC. American Association of Cereal Chemists, 2000. *Approved Methods*. 10<sup>th</sup> edition. Ed. by the American Association of Cereal Chemists. Minneapolis, MN, USA.

Abraján, V.M.A., 2008. Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. Tesis doctoral. Departamento de tecnología de alimentos. Universidad politécnica de Valencia. Valencia, España.

Ahmad A., Davies, J., Randall, S. y G.R.B. Skinner, 1996. Antiviral properties of extract of *Opuntia streptacantha*. *Antiviral Research* 30: 75-85

Alcántara Hernández Brenda Lissette, 2009. Estrategias de comercialización del nopal verdura, para los productores de la delegación de Milpa Alta. Tesis Maestría en Ciencias en administración de negocios. Escuela Superior de Comercio y Administración, Instituto Politécnico Nacional. México D.F.

Álvarez, O.C., Díaz S. C., Ramírez V. D. y Yáñez F.J., 2007. Secado por Aspersion de Mucílago de Nopal. IX Congreso de ciencia de los alimentos y V foro de ciencia y tecnología de alimentos. Departamento de Bioingeniería. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. IPN. Guanajuato, Gto. p. 277.

Anaya-Pérez M.A. y Bautista-Zane R., 2008. Fodder nopal in México: from the 16th to the 20th century. Programa Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma Chapingo. *Revista Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. México. 5 (2):167-182.

Aquino, G. y Bárcenas, N., 1999. Cría de la cochinilla para la producción de grana y sus posibilidades de resurgimiento en México. En: *Memorias del VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. San Luis Potosí. México. pp. 275-303.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists, 1990. *Official Methods of Analysis*. Vol. 1 y 2, 15<sup>th</sup> edition, Helrich, K. (ed.), VA, USA.

Arizmendi, C.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. Universidad autónoma del Estado de México. Premio Nacional en Ciencia y Tecnología de los alimentos. México, D.F.

ASERCA, 1999. La tuna; base del desarrollo de culturas mesoamericanas. Claridades agropecuarias No. 71. México. p. 44.

Barbera, G., Inglese, P. y Pimienta, E., 1999. Agroecología, cultivo y usos del nopal. *Estudio FAO Producción y Protección Vegetal*, 132. Roma, Italia.

Bravo-Hollis, H., 1978. Las cactáceas de México. 2ª ed Vol.1, U.N.A.M. México.

Bravo, H. H. y Scheinvar, L., 1999. El interesante mundo de las cactáceas. Ed. Fondo de cultura económica. México.

Callejas-Juárez, N., Matus-Gardea J.A., García-Salazar J.A., Martínez-Damián M.Á., y Salas-González J.M., 2006. Present situation and market perspectives for prickly pear, nopalito and derivates in the state of México. *Agrociencia* [online]. 2009, 43(1):73-82.

Cárdenas, A., Argüelles W.M. y F. Goycoolea, 1998. On the posible rol of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Perfomance in the Protection of Historical Buildings. *J. Profess. Assoc. Cactus Develop.* Cap. 3. pp.64-71.

Cárdenas, A., Higuera-Ciapara, I. y Goycoolea, F., 1997. Rheology and agregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *J. Profess. Assoc. Cactus Develop.* Cap.2. pp. 152-159.

Casas, A. y Barbera, G., 2002. Mesoamerican Domestication and Diffusion. En: P.S. Nobel, *Cacti: Biology and Uses*. Universidad de California, Los Ángeles. pp. 143-162.

Chandra, S., Eklund, L. y Villareal R., 1998. Use of cactus in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*. 28(1): 41-51.

Chávez-Moreno, C. K., Tecante A., y Casas A., 2009. The *Opuntia* (Cactaceae) and *Dactylopius* (Hemiptera:Dactylopiidae) in Mexico: a historical perspective of use,

interaction and distribution. Springer Science+Business Media B.V. Biodivers Conserv, Cap.18. pp. 3337–3355.

Callen, E.O., 1967. Analysis of the Tehuacan coprolites, .In: The Prehistory of the Tehuacan Valley. BYERS, D.S. (ed.). University of Texas Press. Austin, Texas, USA. pp. 261-289.

Cicero, A.F.G., Derosa, G. y Gaddi, A., 2004. What do herbalists suggest to diabetic patients in order to improve glycemic control? Evaluation of scientific evidence and potential risks. *Acta Diabetologica*. Cap.41. pp. 91-98.

Dok-Go H., Lee, K.H., Kim, H.J., Lee, E.H., Lee, J., Song, Y.S., Lee, Y.-H., Jin, C., Lee Y.S. y Cho, J., 2003. Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. saboten. *Brain Res* 965: 130-136.

Domínguez López A., 1995. Use of the fruits and stems of the prickly pear cactus (*Opuntia* spp.) into human food. *Food Sci Technol Int* 1: 65–69.

Ennouri M., Fetoui,H., Bourret, E., Zeghal, N. y Attia H., 2005. Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus-indica*. 1. Influence of a seed oil supplemented diet on rats. *Bioresour Technol*, In press.

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 para optar al Grado de Maestro en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agronómicas y Forestales. Universidad de Chile. Santiago.

Feugang Magloire, Konarski Patricia, Zou Daming, Stintzing Florian Conrad and Zou Changping, 2006. Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience* 11: 2574-2589.

Felger, R.S., Moser, M.B., 1991. People of the Desert and the Sea, Ethnobotany of the Seri Indians. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. p. 438.

Fernández M.L., Lin, E.C., Trejo, A. y McNamara, D.J., 1992. Prickly pear (*Opuntia* sp.) pectin reverses low density lipoprotein receptor suppression induced by a hypercholesterolemic diet in guinea pigs. *J Nutr* 122: 2330–2340.

Flores-Valdez C.A., de Luna Esquivel J.M. y Ramírez Moreno P.P., 1995. Mercado mundial del nopalito. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y de la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Chapingo, Estado de México.

Flores-Valdez, C. A., 1999. Producción, industrialización y comercialización de Nopalitos. In: Barbera, G., Inglese, P y Pimienta-Barrios, E, eds. Agroecología, Cultivo y Usos del nopal. *Estudio FAO Producción y Protección Vegetal*, 132. Roma. pp. 97-105.

Flores-Valdez, C., 2003. Importancia del nopal. Nopalitos y tunas, producción, comercialización, poscosecha e industrialización. 1ª Ed. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. México. In: C. A. Flores Valdez, ed. pp. 1-18.

Flores, V.C.A. y Olvera M.J., 1995. El sistema Producto Nopal-Verdura. SARH-CIESTAAM: Chapingo, Estado de México.

Frati, A., 1992. Medical implication of prickly pear cactus. In: Proc. 3rd Annual Texas prickly pear council. Eds: Felkar P, Moss LR, 24–25 July, Kingsville, Texas. pp. 29-34.

Frati A.C., Jimenez E. y Ariza, C.R., 1990. Hypoglycemic effect of *Opuntia ficus-indica* in non insulin-dependent diabetes mellitus patients. *Phytother Res* 4: 195–197.

Frati-Munari, A.C., Gordillo, B.E., Altamirano, P. y Ariza, C.R., 1988. Hypo-glycemic effect of *Opuntia streptacantha* Lemaire in NIDDM. *Diabetes Care* 11: 63-66.

Galati, E.M., Monforte, M.T., Tripodo, M.M., d'Aquino D.A.M.R., 2001. Mondello: Antiulcer activity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study. *J Ethnopharmacol* 76: 1–9.

Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., Miceli, N. y Monforte, M.T., 2002. Biological effects of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) waste matter. Note I: diuretic activity. *J Ethnopharmacol* 79:17-21.

Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., d'Aquino, A. y Monforte, M.T., 2003. Biological activity of *Opuntia ficus indica* cladodes II: Effect on experimental hypercholesterolemia in rats. *Pharm Biology* 41 (3): 175-179.

Gardiner, D., Felker, P. y Carr, T., 1999. Cactus extract increases water infiltration rates in two soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (11 y 12): 1707-1712.

Garti, N., 1999. Hydrocolloids as emulsifying agents for oil-in-water emulsions. *J. Disper. Sci. Technol.* 20 (1 y 2): 327-355.

Gentile C., Tesoriere, L., Allegra, M., Livrea M.A. y D'Alessio, P., 2004. Antioxidant betalains from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) inhibit endothelial ICAM-1 expression. *Ann NY Acad Sci* 1028: 481-486.

Granados S. D. y Castañeda, A.D., 1991. El Nopal. Historia, fisiología, genética e importancia frutícola. Editorial Trillas. p. 227.

Gutiérrez P.H. y De la Vara S. R., 2008. Análisis y diseño de experimentos. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Cap. 12.

Gurbachan, S. y Felker, P., 1998. Cactus: new world foods. *Indian Horticulture* 43:29-31.

Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, 2010. Astronomía planetaria, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias- Escuela de Física. Bucaramanga. p. 20.

Hernández, U.A., 2006 Nopal sabroso, benéfico y barato. Procuraduría Federal del Consumidor. Revista del Consumidor Septiembre del 2006. P.-60-63.

Ibanez-Camacho R. y Roman-Ramos, R. 1979. Hypoglycemic effect of *Opuntia* cactus. *Arch Invest Med (Mex)* 10:223-230.

Ibanez-Camacho R., Meckes-Lozoya, M. y Mellado-Campos, V.M., 1983. The hypoglycemic effect of *Opuntia streptacantha* studied in different animal experimental models. *J Ethnopharmacol* 7:175-181.

Instituto Nacional de Ecología, 2007.

<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/71/nverdura.html>.

- Jonas, A., Rosenblat, G., Krapf, D., Bitterman, W. y Neeman, I., 1998. Cactus flower extracts may prove beneficial in benign prostatic hyperplasia due to inhibition of 5 alpha reductase activity, aromatase activity and lipid peroxidation. *Urol Res* 26: 265-270.
- Jones P., Raeini-Sarjaz, M., Ntanios, F., Vanstone, C., Feng, J. y Parsons, W., 2000. Modulation of plasma lipid levels and cholesterol kinetics by phytosterol versus phytostanol esters. *J Lipid Res* 41:697–705.
- Lee E.B., Hyun, J.E: Li D.W: y Moon, Y.I., 2001. The effect of *Opuntia ficus-indica* var. saboten fruit on gastric lesion and ulcer in rats. *Nat Prod Sci* 7:90-93.
- Lee B., Hyun, J.E., Li, D.W: y Moon, Y.I., 2002. Effects of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten stem on gastric damages in rats. *Arch Pharm Res* 25: 67–70.
- Le Houérou H.N. 1996. The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *J Arid Environ* 33: 135–159.
- Lee H., Yoon, J-S., Lee, B.H., Choi, B.H. y Park, K.H., 2000. Screening of the radical scavenging effects, tyrosinase inhibition, and anti-allergic activities using *Opuntia ficus-indica*. *Kor J Pharmacogn* 31: 412–415.
- Loro J.F., I. del Rio, y Pérez-Santana, L. 1999. Preliminary studies of analgesic and anti-inflammatory properties of *Opuntia dillenii* aqueous extract. *J Ethnopharmacol* 67:213-218.
- López, E., 2000. Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE. Universidad de la Habana. La Habana.
- Majdoub, H., Roudesli, S. y Deratani, A., 2001. Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*: extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. *Polymer International*, 50: 552-560.
- McGarvie, D. y Parolis, H., 1981. The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Part 4. The acid-labile, peripheral chains of the mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research*, 94: 57-65.

- Medina-Torres, L. Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. y Katthain, R., 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*, 14: 417-424.
- Medina-Torres, L., Brito-de la Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B. y Alonso, S., 2003. Mechanical properties of gel formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 52: 143-150.
- Mondragón-Jacobo, C., 2004. Mejoramiento genético del nopal: avances al 2003 y perspectivas. En: *El nopal, tópicos de actualidad*. Ed. Esparza, G., Valdéz R. D. y Méndez, S. Universidad Autónoma de Chapingo, México. pp. 49-71.
- Murray P. G., 2000. *El poder curativo del nopal*. Editorial Selector, 2000. p.60.
- Nabham, G. P., 1990. *Gathering the Desert*. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. p. 209.
- Nelson, A., 2001. *High-fiber ingredients*. Eagan Press Handbook Series. Eagan Press St. Paul, Minnesota. Estados Unidos de América.
- Nieddu, G., y Chessa, I., 1997. Distribution of phenotypic characters within a seedling population from *Opuntia ficus-indica*. *Acta Hort.* 438: 37-43.
- Nobel, P. S., 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Ed. Trillas. México.
- Nobel, P. S. y Bobich, E.G., 2002. *Environmental Biology*. In: Nobel, P. S. ed. *Cacti, Biology and uses*. Ed. University of California Press. Los Ángeles, California, Estados Unidos de América. pp. 57-74
- Ochoa, J., 2003. Principales características de las distintas variedades de tuna (*Opuntia* spp.) de la República Argentina In: Inglesse, P. y Nefzaoui, A. eds. *Cactusnet Newsletter*. FAO. International Technical Cooperation Network on Cactus pear. Número especial. Roma.
- Orozco A.C., Díaz S. C., Ramírez V. D. Yáñez F.J., 2006. *Secado por Aspersión de Mucílago de Nopal*. Departamento de Bioingeniería, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. IPN. Mexico.

Park, E.H. y Chun, M.J. 2001. Wound healing activity of *Opuntia ficus-indica*. *Fitoterapia*, 72: 165-167.

Park E.-H., Kahng, J.H. y Paek, E-A., 1999. Studies on the pharmacological actions of cactus: identification of its anti-inflammatory effect. *Arch Pharm Res* 21: 30–34.

Park E.H., Kahng, J.H., Lee, S.H. y Shin, K.H., 2001. An anti-inflammatory principle from cactus. *Fitoterapia* 72:288-90.

Pimienta E., 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara, México.

Prosky, L., Asp, N.G., Schweizer, T.F., Devries, J.W. y Furda, I., 1998. Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study. *J Assoc of Anal chem.*, 71(5): 1017-1023.

Ramsey, J. E. 1999. Evaluación del comportamiento del adobe estabilizado con cal y goma de tuna. Tesis para optar al Título de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria. La Molina. Lima.

Reynolds, G.S., Arias, E., 2001. Introduction. In: Mondragón-Jacobo, C., Pérez-González, S. (Eds.), *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. FAO Plant Production and Protection Paper No 169, Rome, Italy. pp. 1–4.

Ríos R. J. 2004. Manejo general del cultivo del nopal. Secretaría de la Reforma Agraria. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas México-Puebla-San Luis Potosí-Tabasco-Veracruz-Córdoba.

Rodríguez G. S., 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, Facultad de Químico Farmacobiología, UMSNH.

Ruiz, H. F., Guerrero, B.J.A., 2009. Aplicación de las películas comestibles a base de quimostato y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananasa*) en refrigeración. Tesis de maestría. Ciencia en alimentos. Universidad de las Américas Puebla. Puebla. pp. 21-23.

Sáenz, C., Berger, H., Corrales, G.J., Galletti, L., García, C.V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez, A.F., Sepúlveda, E. y Vanero, M.T., 2006. Utilización agroindustrial del nopal. Reimpresión. Boletín de servicios de la FAO. Roma, Italia. p. 13.

Sáenz, C., Garrido, J. y Carvallo, M., 2004. Colorantes naturales derivados de la cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa). *Aliment. Latinoamer.* 251: 56-62.

Sáenz, C., Corrales, J. y Aquino, G. 2002. Nopalitos, mucilage, fiber and cochineal. *In:* P.S. Nobel (ed.) *Cacti: Biology and uses*. University of California, Los Angeles. Estados Unidos de América. P-211-234

Sáenz C., 1995. Food Manufacture and by-products. *In:* Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. Eds: Barbera G, Inglese P, Pimienta-Barrios E, FAO Plant Product and Protection Paper, Rome. pp. 132,137-143.

Sámamo D. L., 2011. Optimización de un deshidratador solar como tecnología para la deshidratación de frutas y hortalizas. Tesis de Maestría. UMSNH. México.

Sánchez Mejorada, H., 1982. Algunos usos prehispánicos de las cactáceas entre los indígenas de México. Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Gobierno del Estado de México. Toluca, México. p. 48.

Saval, S., Pablos, L. y Sánchez, S., 1993. Optimization of culture medium for streptomycin production using response-surface methodology. *Bioresource Technology.* 43:19-25.

Scheinvar, L., 1999. Taxonomía de las *Opuntias* utilizadas. *In:* Agroecología, cultivo y usos del nopal. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal N° 132. Roma. pp. 21-28

Selmi, S., Khalfaoui, A. y Chouki, S., 2002. Cactus in Zelfene (Tunisia): An alternative for Rural development. *Cactusnet Newsletter* 6:5-9.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2009. Con información de las Delegaciones de la SAGARPA.

Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E. y Aceituno, C., 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments.* 68:534-545.

Stintzing F.C. y Carle, R., 2005. Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol Nutr Food Res* 49: 175-194.

Stintzing F.C., Schieber, A. y Carle, R., 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *Eur Food Res Technol* 212: 396-407.

Smith, C. E., 1967. Plant remains. In: The Prehistory of the Tehuacan Valley, Volume one: Environment and subsistence. Byers, D.S. (ed.). University of Texas Press. Austin, Texas, USA. pp. 220-225

Steinmetz, K.A. y Potter, J.D., 1996. Vegetables, fruit, and cancer prevention: a review. *J Am Diet Assoc* 96:1027-1039.

Sudzuki, F., 1999. Anatomía y morfología. In: Barbera, G., Inglese, P. y Pimienta, E., eds. Agroecología, cultivo y usos del nopal. *Estudio FAO Producción y Protección Vegetal*, 132. Roma. pp. 29-36

Sudzuki, F., Muñoz, C y Berger, H., 1993. El cultivo de la tuna (Cactus Pear). Departamento de Reproducción Agrícola. Universidad de Chile.

Trachtenberg, S. y Mayer, A.M., 1982 Biophysical Properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 21: 2835.

Tesoriere L., Fazzari, M., Allegra, M. y Livrea, M.A., 2005. Biothiols, taurine, and lipid-soluble antioxidants in the edible pulp of Sicilian cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits and changes of bioactive juice components upon industrial processing. *J Agric Food Chem* 53:7851-7855.

Tesoriere, L., Butera, D., Pintaudi, A.M., Allegra, V. y Livrea, M.A., 2004. Supplementation with cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit decreases oxidative stress in healthy humans: a comparative study with vitamin C. *Am J Clin Nutri* 80:391-395.

Trejo-González, A., Gabriel-Ortiz, G., Puebla-Pérez, A.M., Huízar-Contreras, M.D., del Rosario Munguía-Mazariegos, M. Mejía-Arreguín, S. y Calva, E., 1996. A purified extract from prickly pear cactus (*Opuntia fuliginosa*) controls experimentally induced diabetes in rats. *J Ethnopharmacol* 55: 27-33.

Trombetta, D., Puglia, C., Perri, D., Licata, A., Pergolizzi, S., Lauriano, E.R., De Pssquale, A., Saija, A. y Bonina, F.P., 2006. Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) cladodes on the healing of dermal wounds in rat. *Phytomedicine*, 13: 352-358.

Valdez, C.R.D., Blanco, M.F., Vázquez, A. R.E. y Magallanes, Q.R. 2008. Producción y usos del nopal para verdura. Edición especial No. 14. *Revista de salud pública y nutrición*. pp. 1,6-8.

Vázquez-Ramírez, R., Olguín-Martínez, M. y Hernández-Muñoz, R., 2006. Reversing gastric mucosal alterations during ethenol-induced chronic gastritis in rats by oral administration of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *World journal Gastroenterol*. 12: 4318-4324.

Wiese J., McPherson, S., Odden, M.C. y Shlipak, M.G. 2004. Effect of *Opuntia ficus-indica* on symptoms of the alcohol hangover. *Arch Internal Med* 164: 1334-1340.

Yoon H.J., Won, C.H. y Moon, S.E., 2004. Allergic contact dermatitis due to *Opuntia ficus-indica* var. saboten. *Contact Dermatitis* 51:311-312.

Zou, D.M., Brewer, M., Garcia, F., Feugang, J.M., Wang, J., Zang, R., Liu, H. y Zou, C.P. 2005. Cactus Pear - a Natural Product in Cancer Chemoprevention. *Nutr J* 4:25.

# APÉNDICE I

## ANÁLISIS BROMATOLÓGICO DE MATERIA PRIMA

### 1. HUMEDAD

MÉTODO OFICIAL DE LA AOAC (934.01) (AACC, 2000)

Consiste en secar la muestra de 3 g. durante 4 horas a 105°C, y por diferencia de pesos se determina.

CÁLCULOS:

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{(P_m - P_s)}{M} \times 100$$

Donde

$P_m$  = peso de la cápsula y la muestra húmeda en gramos.

$P_s$  = peso de la cápsula y la muestra seca en gramos.

$M$  = peso de la muestra húmeda en gramos.

### 2. CENIZAS

MÉTODO OFICIAL DE LA AOAC (923.03) (AOAC, 1990)

Lavar y secar crisoles y llevar a peso constante (100°C). Pesar de 3 a 5 g de muestra.

Colocar en crisol y llevar a incineración en la mufla a 550 °C por 3 h.

CÁLCULOS:

$$\% \text{ cenizas} = \frac{P_{cc} - P_{sc}}{M} \times 100$$

$P_{cc}$  = peso de crisol con cenizas

$P_{sc}$  = peso del crisol a peso cte.

$M$  = muestra.

### 3. LIPIDOS

MÉTODO OFICIAL DE LA AOAC. GOLDFISHER. (AOAC, 1990)

Pesar en cartuchos 3g de muestra

Cubrir con un pedazo de algodón y transferir los cartuchos al equipo de extracción.

Poner a peso constante los matraces 1 h a 105°C atemperar y pesar.

Montar equipo.

Agregar a los matraces poco más de la mitad de hexano o éter.

Hacer circular el agua del equipo e iniciar calentamiento del matraz (aprox. En el 3 de la parrilla) la velocidad del goteo debe ser dos gotas por segundo.

Efectuar la extracción durante 5 a 6 horas.

Desmontar el equipo

Recuperar el hexano o éter.

Colocar los matraces en estufa 1h a 105°C atemperar y pesar.

Evaporar los restos de hexano o éter de los cartuchos colocándolos en la estufa un breve tiempo, o hasta que no se perciba el olor del disolvente usado.

#### CÁLCULOS

$$\% \text{ Extracto Etéreo} = \frac{PG - ps}{M} \times 100$$

Donde

PG = peso en gramos del matraz con grasa.

ps = peso en gramos del matraz vacío a peso constante.

M = peso en gramos de la muestra.

## 4. PROTEÍNAS

### MÉTODO MACRO KJENDHAL

1. En un Matraz kjeldhal colocar los siguientes reactivos:

	HgO	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Muestra	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1. Muestra	0.7 g	10 g	0.7 – 1.0 g	25ml
2. Blanco	0.7 g	10 g	-	25ml

### DIGESTIÓN

2. Colocar el matraz en posición inclinada y calentar en las parrillas del digestor Kjeldhal hasta que se aclare la solución y dejar ebulir por 30 min.
3. Apagar las parrillas y dejar enfriar.

### DESTILACIÓN

1. Disolver las sales con 220ml de agua destilada.
2. Añadir 25ml solución de Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> al 8%. Con la finalidad de precipitar el mercurio y agregar algunas granallas de zinc.
3. Inclinarse el matraz y añadir por la pared 75ml de NaOH al 45%.
4. Tapar muy bien y rápidamente el matraz para evitar la salida de gases tóxicos.
5. Conectar el matraz al condensador.
6. Colocar 50 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.1N en un matraz erlenmeyer.
7. Colocar tres gotas de indicador (rojo de metilo).
8. Iniciar el calentamiento de forma tal que el amoniaco liberado sea destilado hasta un volumen de 200ml de solución destilada.
9. Titular la solución ácida con una disolución de NaOH al 0.1 N, hasta que la solución vire de rosa a amarillo.

## CÁLCULOS

$$\% P = \frac{[(V_{am}N_{am} - V_{bm}N_{bm}) - (V_{ab}N_{ab} - V_{bb}N_{bb})](0.01471 \text{ meqN})(5.83)]}{M} \times 100$$

$V_{am}$  = Volumen de ácido de la muestra

$V_{bm}$  = Volumen de la base de la muestra

$N_{am}$  = Normal ácida de la muestra

$N_{bm}$  = Normal básica de la muestra

$V_{ab}$  = Volumen ácido del blanco

$V_{bb}$  = Volumen base del blanco

$N_{ab}$  = Normal de ácido del blanco

$N_{bb}$  = Normal base del blanco

$M$  = Muestra en gramos

## 5. CARBOHIDRATOS

### MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO

#### EXTRACCIÓN

Transferir una muestra seca de 1 g a una probeta de 100ml y adicionar 10ml de agua destilada, agregar 13 ml de solución de ácido perclórico al 52% con agitación por 20 min. Después, llevar a un volumen final de 100 ml con agua destilada, mezclar perfectamente y mezclar con papel Wathman no. 542 en un matraz erlenmeyer de 250ml. Dicho filtrado (sobrenadante), aforar con agua destilada hasta completar los 250 ml.

#### DETERMINACIÓN

Tomar 10ml del filtrado anterior y aforar hasta 100 ml con agua destilada, después de esto, tomar una alícuota de 1 ml y colocar en un tubo de ensaye con tapa, en un segundo tubo colocar 1 ml de agua destilada usada como blanco y en un tercer tubo colocar 1 ml de la solución de glucosa diluida (10 %); a los tres tubos adicionar 5ml de la solución de antrona previamente preparada (0.1g de antrona disuelta en una solución de 76 ml  $H_2SO_4$ +33 ml  $H_2O$ ). Tapar los tubos y agitar. Posteriormente, se colocarlos a baño María y calentar el punto de ebullición por 12 min. Finalmente, se enfriar rápidamente los tubos, hasta

atemperar con ayuda de un baño frío. Leer el contenido de los tubos en el Espectrofotómetro a 630 nm de longitud de onda.

CÁLCULOS:

% Glu

$$= \frac{(25 * \text{absorbancia de muestra.})}{(\text{Peso muestra} * \text{absorbancia de solución de Glucosa})}$$

## 6. FIBRA DIETÉTICA

MÉTODO ENZIMÁTICO DE PROSKY Y COLABORADORES, 1998

DIGESTIÓN

1. Agregar 1g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml.
2. Agregar 50 ml de solución buffer de fosfatos 0.08M pH 6.
3. Agregar 0.1 ml de la  $\alpha$ -amilasa, a una temperatura de 95 °C; la solución y agitar por 30 min.
4. Enfriar a temperatura ambiente.
5. Ajustar a pH de 7.5 con NaOH (0.275N).
6. Agregar 0.1 ml de la enzima proteasa y se colocó a Baño María a 60 °C, agitándose por 30 min.
7. Atemperar y agregar a un pH de 4.5 con HCl (0.325N).
8. Agregar 0.1 ml de la enzima amilogucosidasa y calentar a Baño María a una temperatura de 60 °C por 30 min., con agitación constante.

FILTRADO

- Llevar el papel filtro a peso constante.
- Filtrar la muestra y lavar con 3 volúmenes de 10 ml de agua destilada, quedando dos partes el filtrado y el sobrenadante (fibra insoluble y soluble).
- Lavar el papel filtro (FD insoluble) con alcohol al 78%, al 95% y acetona con 3 volúmenes de 10ml cada uno.

- Llevar el papel filtro a peso constante a 105 °C por 1 h, atemperar y pesar.
- Colocar la parte líquida (FD soluble) en un vaso precipitado y aforar a un volumen de 100 ml con agua destilada, adicionar 400 ml de etanol al 95% a 60°C; dejar precipitar por 1 hora y filtrar.
- Lavar con alcohol al 78% con 3 volúmenes de 10 ml cada uno aproximadamente, lavar con alcohol al 95% y por último con acetona.
- Colocar el papel filtro a peso constante en la estufa por 1 h a 105 °C, atemperar y pesar.

## CÁLCULOS

Determinar el extracto seco, proteína y cenizas.

NOTA: para este método descartar el peso de las proteínas.

La FD (Fibra Dietética) total se calcula considerando el peso del residuo.

$$FD = (\text{Papel filtro inicial} - \text{el papel filtro con mtra}) - \text{Peso de cenizas.}$$

## APÉNDICE II

### RECUPERACIÓN DE ETANOL USADO EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO POR DESTILACIÓN

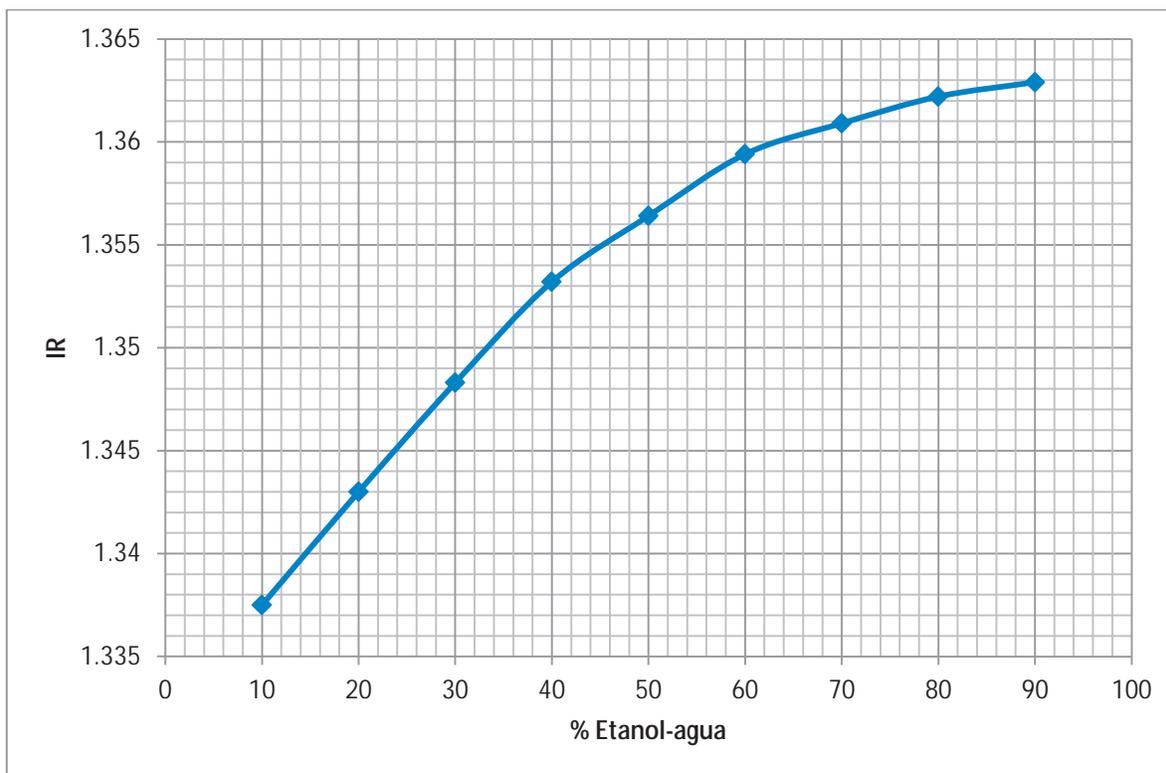
La disolución de etanol y agua obtenido del proceso de extracción de mucilago fue destilado en un equipo de planta piloto de la Facultad de Ingeniería Química de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Figura A.

**Figura A. Destilador sin rectificaciones. Capacidad de 16-18 litros/carga**



Para conocer el grado de pureza del etanol recuperado se realizaron varias diluciones de etanol-agua y se midió el índice de refracción (IR) a cada una de ellas posteriormente se procedió a elaborar el siguiente gráfico.

**Figura B. Curva % etanol agua v.s índice de refracción.**



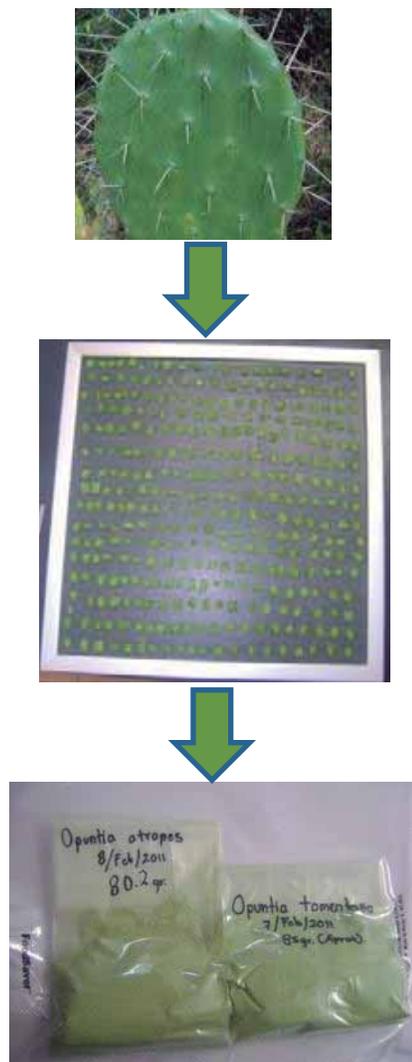
## APÉNDICE III

### DESHIDRATACIÓN DE NOPAL

Figura C. Deshidratador solar



Figura D. Deshidratación de nopal



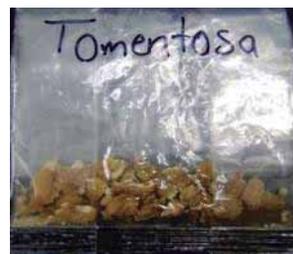
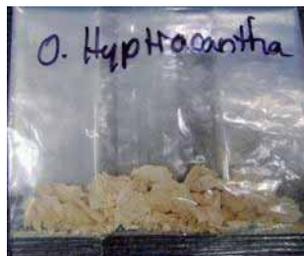
## APÉNDICE IV

### MUCÍLAGOS DE ESPECIES DE *Opuntia* EN ESTUDIO

Figura E. Mucílagos. Primer diseño experimental



Figura E. Mucílagos de las cinco especies de *Opuntia* en estudio



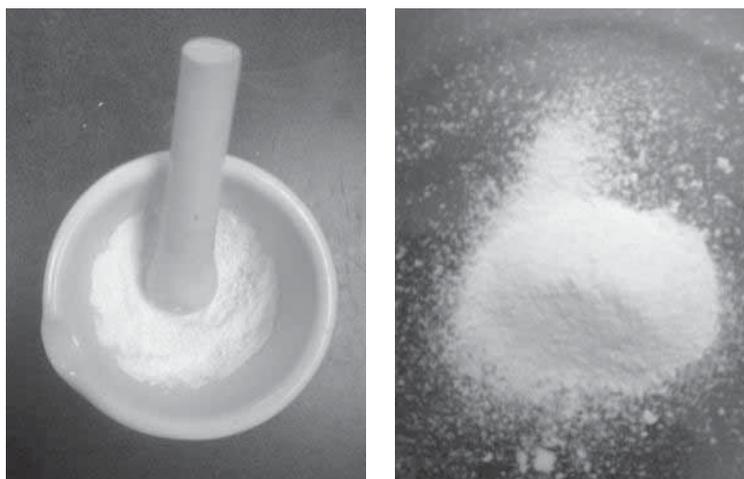
**Figura E. Mucílago de *O. joconostle* en diferentes etapas del proceso de extracción optimizado.**



Mucílago en solución acuosa



Mucílago deshidratado.



Mucílago pulverizado.